

# **Alma Mater Studiorum - Università di Bologna**

---

## **FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile  
Indirizzo Idraulica

DICAM – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA  
in  
Idraulica Marittima LS

## **Ripascimento del litorale Emiliano Romagnolo: ipotesi di riutilizzo delle sabbie dragate dal fiume Po**

Tesi di Laurea di:

**CATERINA ZOPPI**

Relatore:

Chiar.ma Prof.ssa **BARBARA ZANUTTIGH**  
Dr. Ing. **NUNZIO DE NIGRIS**

**Anno Accademico 2009/2010**  
Sessione III

# Indice

Introduzione.....	4
CAPITOLO PRIMO .....	5
<i>Il Problema dell'Erosione Costiera: Cause del Dissesto e Interventi di Difesa.....</i>	<i>5</i>
1.1 Introduzione .....	6
1.2 Le cause dell'erosione costiera .....	9
1.2.1 Il Clima del Moto Ondoso.....	10
1.2.2 Trasporto Solido e Rimodellamento della Spiaggia Attiva.....	16
1.2.3 La Subsidenza della Fascia Costiera.....	20
1.2.4 Trasporto Solido Fluviale.....	22
1.3 Opere di Rigidità di Difesa dall'Erosione.....	28
1.3.1 Opere Artificiali Protettive.....	29
1.3.2 Opere Radenti.....	29
1.3.3 Opere Parallele alla Costa .....	33
1.3.4 Opere Ortogonali alla Costa.....	40
CAPITOLO SECONDO .....	44
<i>Il Ripascimento: il Problema della Fonte di Sabbia con Attenzione al Progettone dell'Emilia Romagna .....</i>	<i>44</i>
2.1 Introduzione .....	45
2.2 Il Ripascimento .....	46
2.2.1 Criteri per la quantificazione del fabbisogno di sabbia .....	47
2.2.2 Efficienza del Ripascimento.....	49
2.2.3 Modalità di Ripascimento .....	52
2.2.4 Aspetti Ambientali del Dragaggio di Sabbie a Fini di Ripascimento.....	58
2.3 Il Ripascimento in Emilia-Romagna: il "Progettone" .....	64
2.3.1 Il Problema della Fonte di Sabbia.....	69
CAPITOLO TERZO .....	71
<i>La sabbia del Fiume Po: studio di fattibilità del ripascimento della spiaggia di Misano Adriatico .....</i>	<i>71</i>
3.1 Introduzione .....	72

3.2	Idraulica del Po, scenari di trasporto solido allo stato attuale e in presenza di sbarramenti .....	73
3.2.1	Analisi granulometrica dei sedimenti del fiume Po.....	75
3.3	La Spiaggia di Misano Adriatico .....	85
3.3.1	Evoluzione Morfologica.....	89
3.3.2	Analisi dei Sedimenti della spiaggia di Misano .....	100
3.3.3	Elaborazione del Clima Meteomarino del Paraggio .....	111
3.3.4	Calcolo del Trasporto Solido.....	119
	CAPITOLO QUARTO .....	125
	<i>Ipotesi di Trasporto di Sabbia da Isola Serafini a Misano Adriatico .....</i>	<i>125</i>
4.1	Introduzione .....	126
4.2	La navigazione sul fiume Po.....	127
4.2.1	Il sistema idroviario Padano Veneto.....	131
4.2.2	Dragaggi per la manutenzione dei fondali navigabili e trattamento delle sabbie con il metodo del Soil Washing .....	133
4.3	Ipotesi di trasporto da Isola Serafini a Misano Adriatico.....	139
4.3.1	Ipotesi di trasporto su gomma .....	140
4.3.2	Ipotesi di trasporto fluvio-marittimo.....	145
4.3.3	Risultati .....	152
	Conclusioni.....	154
	Bibliografia.....	156

## Introduzione

Il problema dell'erosione costiera, è purtroppo una realtà sempre più presente della quale prendere atto. I dati mostrano che ad oggi, il 42 % delle coste Italiane sono in erosione. Per far fronte a questa lenta e inesorabile “battaglia” con il mare, si è cercato di proteggere i litorali con adeguate opere di difesa. In modo particolare, negli ultimi anni, sono state introdotte tecniche “soft” quali i ripascimenti.

Tale tecnica consiste nell'apporto di materiale di idonee caratteristiche sulle spiagge soggette all'erosione.

Ciò che si vuole evidenziare in questo ambito, è il problema della fonte di sabbia per eseguire questo tipo di intervento. Sarà presa visione di un progetto attuato in Emilia-Romagna, il Progettone, di ripascimento con sabbie sottomarine, da confrontare con una nuova ipotesi: prelevare la sabbia presente a monte dello sbarramento di Isola Serafini, situata lungo l'asta fluviale del Po.

Tale sabbia, andrebbe comunque dragata per garantire la navigabilità del corso d'acqua. L'intervento di ripascimento viene ipotizzato sulla spiaggia di Misano Adriatico.

Si valuteranno pertanto le caratteristiche granulometriche della sabbia del Po, confrontandole con quella di Misano Adriatico, e valutandone la compatibilità.

Tramite un semplice modello matematico, si cercherà di quantificare il trasporto di materiale longshore per comprendere al meglio l'entità del ripascimento da attuare.

Si farà inoltre un breve accenno sulla questione del trattamento del materiale per abbattere le eventuali sostanze contaminanti.

Infine, si valuterà la fattibilità in termini economici dell'intervento, in relazione al tipo di trasporto che si intende utilizzare. Le ipotesi che si prenderanno in considerazione saranno:

- trasporto su gomma;
- trasporto fluvio – marittimo.

L'obiettivo è legato ad un concetto molto semplice: il riutilizzo di risorse presenti in natura.

## **CAPITOLO PRIMO**

### ***Il Problema dell'Erosione Costiera: Cause del Dissesto e Interventi di Difesa***

## 1.1 Introduzione

Il litorale Emiliano-Romagnolo e l'intero ecosistema costiero, rivestono un'importanza notevole sotto diversi punti di vista.

La funzione di difesa fisica svolta dalla costa sul territorio, soprattutto nei confronti di eventi estremi ormai purtroppo sempre più ricorrenti.

Una risorsa economica di immenso valore.

Il litorale Emiliano – Romagnolo (*figura 1.1*), si estende dalla foce del Torrente Tavollo, tra Cattolica e Gabicce, alla foce del Po di Goro; con i suoi 130 km di costa bassa e sabbiosa è una delle spiagge più importanti d'Europa sotto il profilo turistico balneare.

Sotto l'aspetto amministrativo, la fascia costiera regionale è suddivisa nei territori di quattordici Comuni appartenenti alle province di Rimini, Forlì, Ravenna e Ferrara.

Provincia	Comune	Fronte a mare (km)
RN	Cattolica	2,4
RN	Misano	3,2
RN	Riccione	6,2
RN	Rimini	15,0
RN	Bellaria	6,7
FC	San Mauro Pascoli	0,7
FC	Svignano sul Rubicone	0,2
FC	Gatteo	0,8
FC	Cesenatico	7,0
RA	Cervia	9,0
RA	Ravenna	37,0
FE	Comacchio	22,8
FE	Codigoro	1,1
FE	Goro	18,0
	<b>TOTALE</b>	<b>130,1</b>

*Tabella 1.1: Suddivisione amministrativa della fascia costiera regionale (Piano Coste '96)*





Figura 1.1-Litorale della Regione Emilia-Romagna

Nel mondo si stima che la percentuale di spiagge in erosione sia pari all'80%, in Italia la media si attesta sul 42,5%, in Emilia-Romagna sul 24%.

Tale situazione del litorale è attribuibile ai molti interventi di ripascimento effettuati dalla Regione negli ultimi 7-8 anni.

Non solo:

- ✓ la protezione del litorale, che vincola ogni intervento alla salvaguardia e al ripristino dei valori paesaggistico-ambientali del territorio costiero;
- ✓ l'adozione di uno studio di pianificazione generale di tutta la costa.

Tra il 1981 e il 1984, la Regione ha bloccato le escavazioni degli inerti lungo i fiumi per aumentare l'apporto di sabbia al mare, ha favorito la costruzione di grandi opere acquedottistiche, in grado di aumentare l'apporto di acqua di superficie alla costa allo scopo di ridurre la subsidenza, e ha realizzato il primo grande intervento di ripascimento in Italia.

Inoltre sono state istituite e rilevate per la prima volta le reti per monitorare l'intero litorale.

La sabbia è quindi la risorsa fondamentale su cui dovrà essere basata la difesa del litorale in futuro.

Solo conoscendo nel dettaglio l'entità dei processi e il grado di incidenza dei fattori che ne governano l'equilibrio, si può salvaguardare un sistema litoraneo complesso come quello Emiliano-Romagnolo.



## 1.2 Le cause dell'erosione costiera

L'equilibrio di un litorale sabbioso è estremamente dinamico e dipende dall'interazione di diversi fattori:

- ✓ il moto ondoso e le correnti,
- ✓ il trasporto eolico,
- ✓ gli apporti sedimentari fluviali,
- ✓ la subsidenza (naturale o indotta),
- ✓ i fenomeni tettonici di sollevamento/abbassamento del settore costiero,
- ✓ le variazioni eustatiche del livello marino,
- ✓ le attività antropiche.

Esso è oggi compromesso dall'uso intensivo del territorio e dalla concomitanza di interventi artificiali e fenomeni naturali. L'estesa urbanizzazione e lo sviluppo dell'agricoltura, la diminuzione dell'apporto di sedimenti da parte dei fiumi, la presenza di opere costiere, il prelievo di acqua e metano dal sottosuolo e i marcati tassi di subsidenza hanno fortemente accentuato la vulnerabilità della costa emiliana romagnola oggi soggetta ad estesi processi erosivi. Dagli anni '30 lo Stato ha realizzato opere di difesa dall'erosione per 65 km di litorale, ed opere di contenimento dalle ingressioni marine per circa 30 km. Questi interventi hanno permesso di contenere, in buona misura localmente, l'avanzata del mare ma hanno anche prodotto una marcata alterazione dei caratteri paesaggistici - ambientali originali della costa. È ormai dimostrato come la presenza d'infrastrutture costiere, quali opere portuali e opere di difesa, condizioni l'andamento delle correnti che determinano il trasporto delle sabbie contribuendo così ad accentuare l'erosione. In generale si può affermare che l'equilibrio di una spiaggia è strettamente correlato al bilancio dei sedimenti in entrata e in uscita da essa. Dalle terre emerse le coste ricevono, attraverso i fiumi, gran parte dei sedimenti che alimentano le spiagge, la subsidenza invece, incide fortemente sulla sottrazione di materiale. Le opere di difesa rigide, inoltre, hanno dimostrato di avere anch'esse effetti negativi sulla dinamica costiera, accentuando l'erosione delle zone sopraflutto alle opere. In ragione di questa evidenza la Regione ha spostato la sua azione verso tipi di difesa morbida, trovando nel ripascimento artificiale con sabbie litoranee e/o sottomarine la soluzione ottimale per la difesa delle spiagge dall'erosione.

## 1.2.1 Il Clima del Moto Ondoso

Per individuare la dinamica litoranea e, di conseguenza, le modificazioni all'assetto morfologico delle spiagge basse e sabbiose che caratterizzano la costa della regione Emilia-Romagna, occorre definire le condizioni del moto ondoso incidente, relative sia al regime medio annuo e, eventualmente, stagionale, sia alle caratteristiche degli eventi estremi che possono colpire la costa.

Le condizioni del moto ondoso medie, sono infatti responsabili dell'evoluzione dei litorali a lungo termine, attraverso il regime delle correnti lungo riva e del conseguente trasporto dei sedimenti.

Le condizioni del moto ondoso estreme sono invece necessarie al corretto dimensionamento degli interventi lungo la costa, per verificare fenomeni erosivi e le variazioni lungo il profilo della spiaggia.

Le varie fonti informative disponibili per la ricostruzione del clima meteo marino sono rappresentate da:

- osservazioni delle piattaforme di perforazione dell'AGIP tra cui la piattaforma PCB, posizionata a circa 20 km da Ravenna;
- osservazioni raccolte dall'Istituto Meteorologico Regionale Olandese;
- osservazioni strumentali davanti al delta del Po.

Per quanto riguarda i dati provenienti da misure dirette in mare con boe ondametriche, la fonte informativa più aggiornata è quella relativa alla boa collocata al largo di Ancona e inserita, dal 1999, nella Rete Ondametrica Nazionale, RON. Queste informazioni sono parzialmente integrabili con i dati registrati dalla boa di Punta Maestra, entrata a far parte della RON nel 2002 e collocata davanti al Delta del Po.

I dati provenienti dalle boe ondametriche non possono essere utilizzati direttamente per ricostruire il regime del moto ondoso davanti alla Regione Emilia-Romagna. Le due boe sono infatti collocate lontano dalla costa regionale ed è necessario trasferire le informazioni rilevate dalle boe applicando modelli che ricostruiscono la distribuzione spaziale dei venti nell'area di generazione delle onde.

La Rete Ondametrica Nazionale (RON), attiva dal luglio 1989, è ad oggi composta da 15 stazioni di misura, costituite da una stazione a terra e da una boa posta in mare, situate a La Spezia, Alghero, Ortona, Ponza, Monopoli, Crotone, Mazara, Cetraro,

Ancona, Catania, Capo Linaro, Capo Gallo, Punta della Maestra, Capo Comino e Cagliari, come mostrato in *figura 1.2*.



*Figura 1.2: Ubicazione delle stazioni della rete RON.*

Sino al 2002 la rete era costituita da boe direzionali pitch-roll Datawell - Wavec e da boe a traslazione Datawell - Waverider, dotate di un sistema di localizzazione che utilizzava il satellite ARGOS per il controllo in continuo della posizione e che trasmettevano le osservazioni via radio alle stazioni locali di ricezione sulla costa.



*Figura 1.3: Boa Datawell-Wavec e Datawell-Waverider.*

I dati sono acquisiti normalmente per periodi di 30 minuti ogni 3 ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate particolarmente significative.

Per valori di  $H_s$  superiori a 3.0 m, la boa di Ancona acquisisce infatti dati in continuo e li produce ogni mezz'ora.

L'elaborazione dei dati fornisce i seguenti risultati:

- $H_s$  (m), altezza d'onda significativa spettrale;
- $T_p$  (sec.), periodo di picco;
- $T_m$  (sec.), periodo medio;
- $D_m$  (gradi N), direzione media di propagazione.

Vengono inoltre elaborati i seguenti parametri relativi allo spettro: la densità di energia, la dispersione direzionale (spreading), l'asimmetria (skewness) e la curtosi.

Nel 2002 la rete è stata completamente ristrutturata e potenziata. In primo luogo sono state aggiunte le ultime quattro stazioni di Punta Maestra, Civitavecchia, Capo Comino, Palermo, operative dal 1 luglio 2002, e recentemente la rete è stata ulteriormente integrata con l'installazione del nuovo sito ondametrico di Cagliari.

Tutta la rete è stata progettata per funzionare in tempo reale: i dati sono misurati ed analizzati dalle boe ogni trenta minuti per essere poi inviati via radio alle stazioni di ricezione locale a terra, dove sono elaborati e classificati. Ogni tre ore il centro di controllo di Roma si connette con tutte le stazioni attraverso collegamenti I.S.D.N. e trasferisce tutti i dati sul server del centro.

Le 14 boe accelerometriche a traslazione attualmente impiegate sono di tipo Triaxis (*figura 2.4*), le cui principali caratteristiche tecniche sono:

- forma sferica con diametro pari a 0,9m (peso di 200kg);
- sistema di alimentazione a pannelli solari e batterie tampone;
- sensori allo stato solido;
- frequenza di campionamento dei dati a 4Hz;
- analisi dati spettrale e zero-crossing a bordo, continua sull'intera serie temporale di 26 minuti;
- trasmissione dati via radio con frequenza assegnata di 44.8MHz;
- tracciamento satellitare della posizione delle boe via GPS.

Tali caratteristiche hanno permesso analisi più accurate delle proprietà del moto ondoso nei nostri mari minimizzando i rischi di perdite definitive dei dati.





Figura 1.4: Boa accelerometrica di tipo Triaxis.

In ragione della disposizione geografica, i mari del III e IV Quadrante (Figura 1.5) non influenzano la dinamica del litorale Emiliano-Romagnolo.

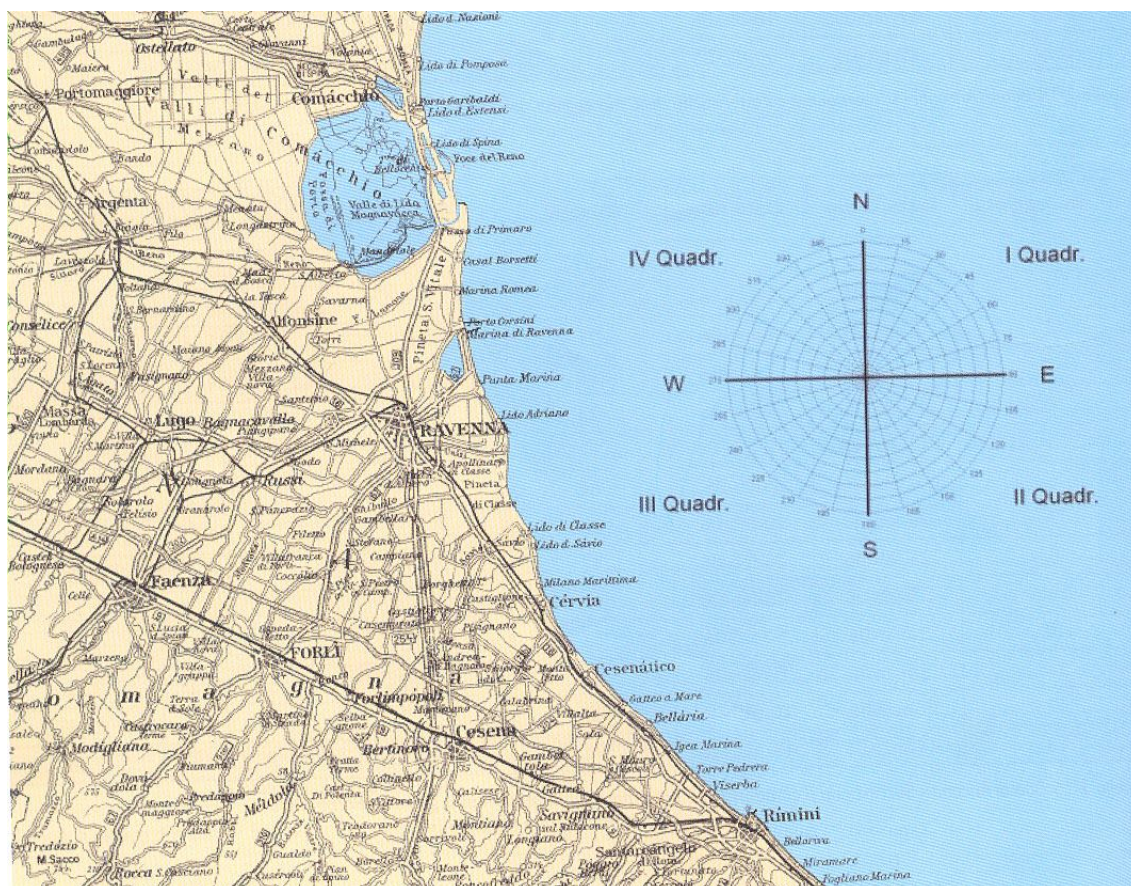


Figura 1.5-Quadranti.

Pertanto ai fini dell'analisi del regime e dell'assetto della costa regionale, è opportuno prendere in esame solo gli eventi che provengono dal I e II Quadrante.

Dall'analisi dei dati risulta che durante il periodo gennaio 2000-marzo 2006 si sono registrati 218 eventi classificati come mareggiate. Le mareggiate così identificate hanno comportato quasi 340 giorni di mare mosso. Su un totale di 160 mareggiate provenienti da questi due quadranti, il II Quadrante ( $90^{\circ}N < 180^{\circ}$ ) è stato interessato dal maggior numero di eventi, 117, mentre dal I Quadrante ( $0^{\circ}N < 90^{\circ}$ ) sono pervenute 43 burrasche. Tra queste mareggiate, 59 di esse, pari al 37%, hanno avuto durata massima di un giorno, mentre 84 eventi, pari al 52% dei casi, sono stati caratterizzati da una persistenza di non più di 3 giorni consecutivi.

In termini di singoli settori di provenienza, il settore di Scirocco, mediamente attorno ai  $135^{\circ}N$ , è quello che presenta le frequenze più alte.

Il clima del moto ondoso al largo è la base per definire il regime idrodinamico sottocosta e conseguentemente il trasporto solido litoraneo.

In figura 1.4, si riporta in forma schematica, la direzione del trasporto litoraneo dei sedimenti. Dalla figura 1.6 si può notare come la direzione prevalente sia da Sud verso Nord; tuttavia sono presenti due tratti di divergenza in corrispondenza dei tratti a Sud delle foci del Savio e del Reno dove la direzione del trasporto è da Nord verso Sud.

Il che determina la formazione di due punti di “zero” del trasporto, precisamente a Pinarella di Cervia e Porto Corsini. Un terzo punto di “zero” si trova in corrispondenza dell'imboccatura della Secca di Goro.





Figura 1.6-Direzione del trasporto solido lungo costa



## 1.2.2 Trasporto Solido e Rimodellamento della Spiaggia

### Attiva

Dopo aver analizzato il clima del moto ondoso, può essere interessante parlare di come esso influenzi assieme ad altri fattori, il trasporto di materiale lungo la costa.

Il trasporto solido è generato da diversi fattori quali:

- *le onde*, che mobilizzano e portano in sospensione i sedimenti;
- *le correnti*, che trasportano i sedimenti;
- *il vento*, che è in grado di trasportare i granuli dalla parte emersa a quella sommersa del litorale;
- *gli interventi antropici* sulla spiaggia.

Dall'analisi del trasporto solido è possibile dedurre le cause e i meccanismi che portano all'erosione del litorale o all'accumulo di una grande quantità di sedimenti. L'azione del trasporto solido assume grande importanza nello studio di numerosi problemi di ingegneria costiera quali:

- l'evoluzione del profilo di spiaggia durante le mareggiate ed in risposta alle variazioni di livello del mare;
- la risposta di un litorale al ripascimento;
- la variazione della posizione della linea di riva;

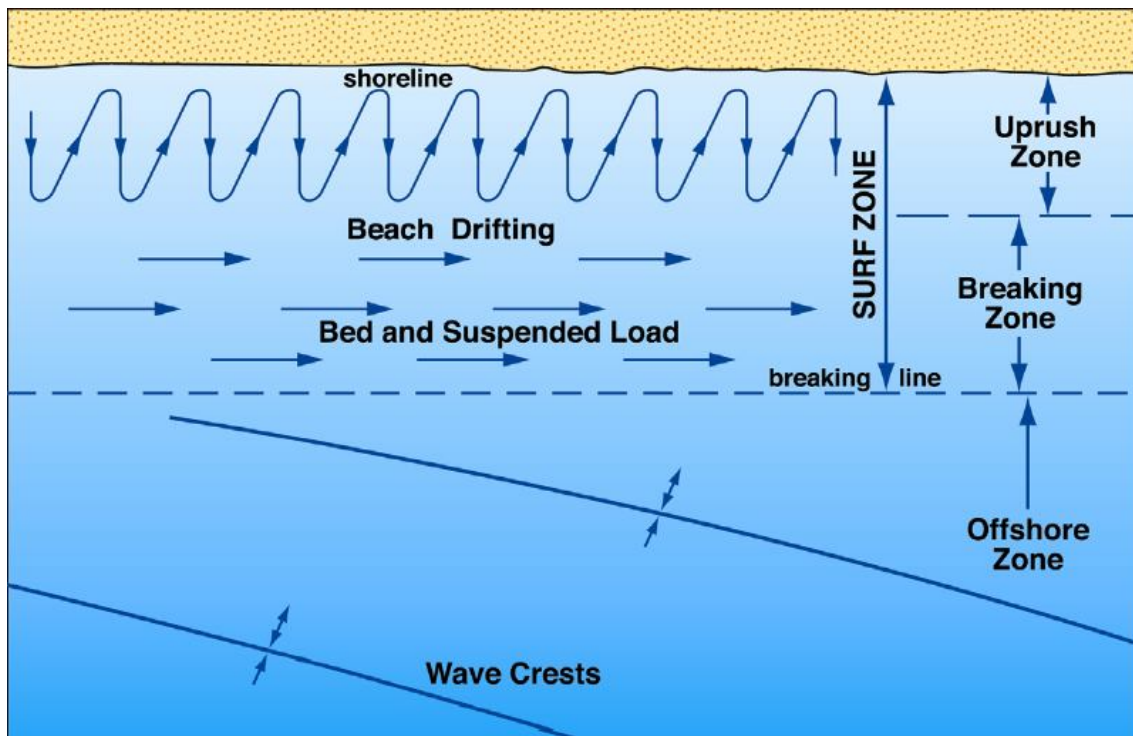
Il trasporto solido può essere scomposto in due componenti di moto: trasversale e longitudinale, anche se è chiaro che in realtà i due tipi di trasporto si presentano di solito simultaneamente, con una minore o maggiore predominanza di uno di essi a seconda dell'angolo formato dal fronte delle onde incidenti con la linea di battigia.

Il trasporto solido trasversale avviene in direzione perpendicolare alla linea di riva (cross-shore) ed è dovuto principalmente alle correnti di ritorno, al vento, ai fondali ripidi e alle correnti di marea in mari a forte escursione.

Il trasporto solido longitudinale avviene in direzione parallela alla linea di battigia (long-shore) ed è causato principalmente dalla corrente litoranea generata dal frangimento delle onde, oltre che, come nel caso di trasporto cross shore, dal vento e dalle correnti di marea.

Generalmente si usa distinguere due zone:

- zona offshore (al largo) quella che, partendo dal limite esterno dei frangenti, va verso mare;
- surfzone (zona dei frangenti) quella compresa tra il predetto limite e la linea di riva.



*Figura 1.7: Surf Zone e Offshore Zone*

L'estensione di una zona dei frangenti è generalmente ben definita in relazione all'altezza e al periodo delle onde che arrivano alla spiaggia. Infatti, le onde provenienti da largo raggiungono i fondali più bassi in prossimità della costa, diventando più lente a causa dell'attrito sul fondo e quindi più corte e più alte. Ciò fa aumentare la loro ripidità, così che esse frangono appena raggiungono il limite di stabilità. Appare quindi chiaro che la larghezza dei frangenti dipende dal clima delle onde presenti nel paraggio, che generalmente varia con la stagione.

Le onde in arrivo generalmente risultano inclinate rispetto alla riva stessa: quindi esse presentano una componente lungo riva che induce una corrente nella stessa direzione (longshore current). La direzione e la velocità della corrente lungo riva possono rimanere ragionevolmente costanti per giorni e settimane, nonostante che l'energia immessa nella zona dei frangenti, legata alla variabilità della ripidità e all'angolo che il fronte d'onda forma con la linea di riva in acque profonde, cambi continuamente.

Grandi volumi di sedimenti vengono messi in sospensione (suspended load) o rotolati al fondo (bed load) nella zona dei frangenti dalla turbolenza causata dal frangimento. Il flusso della corrente lungo riva, agendo sui sedimenti così movimentati li trasporta lungo la spiaggia generando il cosiddetto trasporto litoraneo (littoral drift).

Anche la natura e la larghezza della zona offshore varia molto essendo influenzata dalla sedimentazione e dai movimenti tettonici. In questa zona una delle più importanti azioni delle onde è il trascinamento del sedimento verso riva o verso largo.

Il trasporto di sedimenti verso riva avviene durante periodi prolungati di moderata attività ondosa (azione di mare morto o *swell*).

Il trasporto verso mare si manifesta durante le mareggiate (azione di mare vivo o *storm*).

Nella condizione di *swell*, essendo relativamente lenta, fa sì che dopo la risalita molta acqua percoli attraverso la sabbia prima di tornare a largo per cui, se le onde hanno periodo lungo e la spiaggia è sufficientemente permeabile, il flusso di ritorno sarà minimo. In queste condizioni si ha un accrescimento della spiaggia (condizione estiva).

Nella condizione di burrasca (*storm*), in genere invernali, le onde, più ripide delle precedenti, avranno periodi brevi (onde quasi ogni secondo) e le quantità enormi di acqua in gioco renderanno subito saturo il fondo della spiaggia e il piano di scorrimento dell'acqua coinciderà con il fondo stesso. Il flusso di ritorno sarà molto elevato e ricco di sedimenti che sono rapidamente spostati verso largo. Si formerà una barra a largo e una fossa sottocosta. La barra continuerà a crescere fino a quando non sarà sufficientemente alta da far frangere le onde di burrasca. Da questo punto in poi le onde arriveranno sulla spiaggia con una minore forza e si ristabilirà quindi un equilibrio.

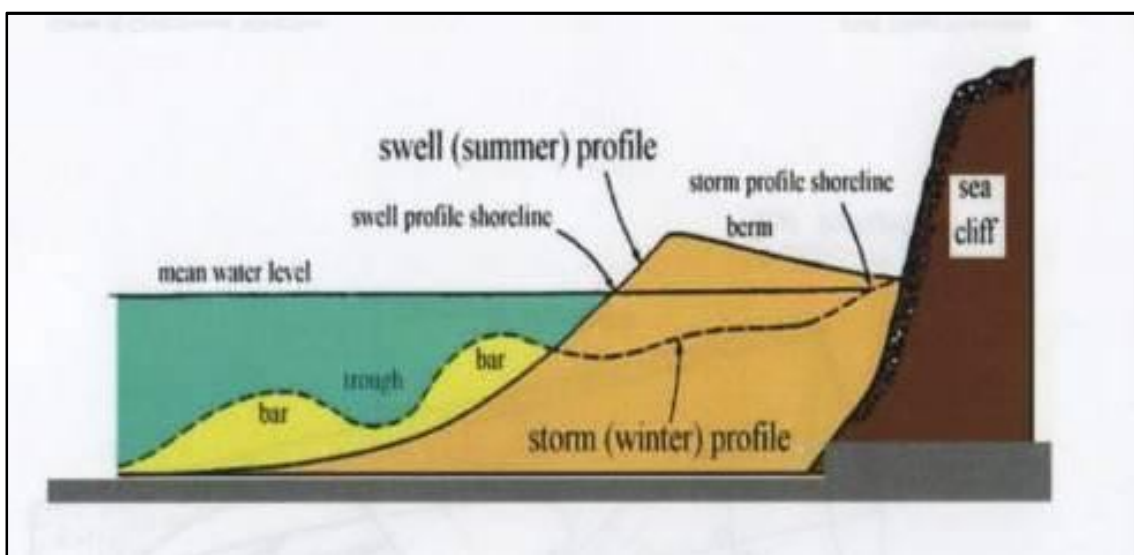


Figura 1.8 – Swell profile and storm profile

Un'altra caratteristica che distingue la zona inshore da quella offshore è la granulometria del materiale al fondo: le particelle trovano collocazione dove la forza risultante del trasporto di massa e l'azione di gravità, dovuta alla pendenza della spiaggia che spinge le particelle verso largo, si bilanciano. Poiché la pendenza generalmente aumenta avvicinandosi a riva in tale senso aumenta anche la granulometria delle particelle.

Il trasporto di massa è diretto in senso ortogonale al fronte d'onda, mentre la gravità agisce normalmente alle isobate. Quando le due direzioni non sono parallele, le particelle di sedimento possono oscillare sotto la loro azione in un movimento a sega lungo la spiaggia, oscillando attorno ad una distanza di equilibrio dalla riva.

In generale si può ritenere che a lungo termine le sezioni offshore di un profilo di spiaggia rimangano approssimativamente stabili mentre il tratto di spiaggia ad essere oggetto di modellamento è quello compreso tra la profondità in cui le onde frangono eccezionalmente, *profondità di chiusura*, e la risalita sulla spiaggia, *run-up*.

La profondità di chiusura,  $h_c$ , può essere valutata tramite la formula di Krauss:

$$\frac{h_c}{H_0} = 2.28 - 10.91 \frac{H_0}{L_0}$$

in cui  $H_0$  è l'altezza d'onda significativa superata per 12 ore all'anno e  $L_0$  la lunghezza d'onda al largo della linea dei frangenti o breaker line.

Il run-up può essere valutato tramite:

$$R_u = \xi_0 H = \tan \alpha \sqrt{(HL)_0}$$

quindi risulta dipendere parimenti dalla altezza e dalla lunghezza delle onde a largo e dalla pendenza della spiaggia.  $\xi_0$  è il parametro di Irribarren – Battjes valutato a largo, tramite cui si classifica la tipologia dei frangenti in base alle caratteristiche dell'onda, ovvero altezza lunghezza e pendenza del fondale.

Il valore del parametro di Irribarren – Battjes identifica tre categorie di frangente con caratteristiche differenti:

- $\xi < 0.5$ : spilling, caratterizzato da turbolenza sulla cresta dell'onda;
- $0.5 < \xi < 3.3$ : plunging, onda in cui la cresta ricade nel cavo e si crea turbolenza nella parte bassa della colonna d'acqua;
- $\xi > 3.3$ : surging, in cui la turbolenza è generata dall'attrito sul fondo.

A parità di altezza e lunghezza d'onda, il valore di  $\xi_0$  aumenta con l'aumentare della pendenza del fondo, perciò il frangente spilling è caratteristico di fondali piatti, mentre quello surging si sviluppa su elevate pendenze.

Individuati gli estremi della spiaggia attiva, si può suddividere il profilo trasversale in tre zone caratterizzate da diverso comportamento; sostituendo nelle equazioni sopra riportate valori caratteristici delle onde e dei fondali tipici della costa Romagnola, ad esempio  $H_0 = 1$  m,  $L_0 = 30$  m e  $\text{tg}[\alpha] = 10 - 20\%$ , si ottengono estensioni che per le tre zone valgono:

- |   |              |
|---|--------------|
| - zona di risalita                      | 1 – 1.5 m;   |
| - zona intertidale                      | 0.5 – 0.8 m; |
| - zona fino alla profondità di chiusura | 5 – 6 m.     |

Quindi, lungo le coste basse e sabbiose di un bacino chiuso e poco profondo come il Mare Adriatico, l'estensione in quota della spiaggia attiva può essere valutata tra i 6 e gli 8 m.

### 1.2.3 La Subsidenza della Fascia Costiera

La subsidenza si è rivelata nel corso degli ultimi decenni la più seria minaccia alla stabilità del litorale Emiliano-Romagnolo.

Esso è costituito da un sistema ambientale molto fragile in quanto costituito da un sottile rilevato sabbioso, la spiaggia emersa, ormai priva del sistema dunale retrostante, che separa il mare da una vasta pianura in parte al di sopra del livello del mare di pochi metri e in parte, nel centro-nord, al di sotto di alcuni metri.

Su questo litorale nel corso del '900 si è insediato e ancora si sta sviluppando un sistema urbano lungo più di 80 km, sede di una delle principali industrie turistico-balneari d'Europa.

L'area costiera dell'Emilia-Romagna si abbassa per due motivi:

- ✓ per la compattazione dei terreni, quindi per ragioni naturali inevitabili;
- ✓ per l'estrazione di fluidi dal sottosuolo (acque e metano), quindi per cause antropiche.



La subsidenza naturale varia nell'area costiera regionale fra 0,5 e 3 mm/anno. I valori minori si riscontrano a sud di Rimini e i maggiori nell'area deltizia del Po.

Per quantificare nel complesso la variazione del livello del mare rispetto a quello del terreno, alla subsidenza naturale, va aggiunto l'eustatismo, poco più di 1 mm/anno nell'ultimo secolo.

Pertanto, per le sole cause naturali, il mare si avvicina al livello del terreno con una velocità che varia tra 1,5 mm nell'area più a sud e 4 mm nell'area prossima al delta del Po.

Per completezza si riportano alcuni dati relativi ai movimenti verticali del suolo dei due litorali:

- da Cattolica alla foce del Po di Goro
- da Savignano sul Rubicone a Porto Garibaldi.

#### *Il litorale da Cattolica alla foce del Po di Goro*

L'osservazione dei movimenti verticali del suolo lungo questa direttrice fondamentale è stata condotta lungo le linee di livellazione situate immediatamente a ridosso del litorale.

Procedendo da sud verso nord:

- costa da Cattolica a Marebello: abbassamenti di 4-5 mm/anno che risultano raddoppiati rispetto al trend del periodo precedente;
- litorale riminese: abbassamenti di 9 mm/anno (vedi figura 1.5)
- verso Cesenatico: abbassamenti di 10 mm/anno;
- da Cervi fino al Lido di Classe: abbassamenti di 10 mm/anno;
- dalla Pineta di Classe sino a Lido Adriano: abbassamenti più rilevanti rispetto all'intero litorale, 15 mm/anno;
- l'arco di litorale prospiciente la Sacca di Goro: abbassamenti medi intorno 10 mm/anno.

A proposito di quest'ultimo tratto, va detto che gli abbassamenti osservati, sono in parte da attribuirsi al peso e al costipamento dell'argine a mare presente.

#### *Il litorale da Savignano sul Rubicone a Porto Garibaldi*

Il profilo dei movimenti verticali lungo tale direttrice, risulta particolarmente significativo al fine di evidenziare l'andamento della subsidenza nell'entroterra costiero ad una distanza dal litorale variabile da pochi km fino a un massimo di circa 15 km.

In gran parte del profilo, gli abbassamenti di collocazione mediamente nella fascia compresa tra 5 e 7 mm/anno.

La località a più alta velocità di abbassamento dell'intero litorale regionale è il Lido di Dante.

Il problema della subsidenza, che colpisce la regione da più di 50 anni, oltre a minarne la stabilità, determina costi altissimi.

Si può stimare in circa 100 milioni di m<sup>3</sup> il quantitativo di materiale sottratto dalla subsidenza in passato lungo tutto il litorale e in poco meno di 1 milione di m<sup>3</sup> la sottrazione annuale dell'ultimo periodo.

Il costo del materiale da ripascimento che ogni anno occorrerebbe portare per compensare il materiale sottratto è di circa 15 milioni di euro.

Senza contare i costi derivanti dalla necessità di rialzare argini, banchine e moli portuali e quelli per la protezione degli abitanti sempre più esposti all'azione del mare. E' quindi nell'interesse di tutti, soprattutto nella prospettiva di un innalzamento del livello del mare dovuto ai mutamenti climatici, ridurre la subsidenza di origine antropica.

## **1.2.4 Trasporto Solido Fluviale**

Il litorale della Regione Emilia-Romagna è costituito in massima parte da sabbie portate a mare dai numerosi fiumi e torrenti, che a una distanza di 10-15 km l'uno dall'altro qui trovano foce.

La sua disposizione ad arco, compreso tra il promontorio di Gabicce a Sud e la cuspide deltizia del Po a Nord, permette di ricevere contributi sedimentari sia dalla costa marchigiana che dai rami meridionali del delta del Po. Il contributo del Po riguarda però in massima parte lo Scanno di Goro e la spiaggia di Volano.

Il maggior contributo di materiale sedimentario delle spiagge, proviene quindi dagli apporti fluviali; anzi, tale fattore risulta spesso fondamentale sia nella formazione che nell'esistenza della spiaggia stessa, soprattutto se questa è bassa e sabbiosa come quella della Regione Emilia-Romagna.

In questi casi, l'equilibrio della spiaggia risulta fortemente condizionato dalle variazioni del regime di trasporto sedimentario fluviale.

Tali variazioni possono essere:

- di origine naturale;
- di origine antropica.

La principale causa naturale risiede nell'alternarsi di diversi regimi pluviometrici, quali l'aumento o diminuzione della piovosità totale o la variazione nella frequenza degli eventi estremi.

Le cause antropiche vanno ricercate negli interventi atti alla regimazione dei corsi d'acqua nei tratti montani, all'uso del suolo, al prelievo di materiale litoide dagli alvei.

Sarebbe di particolare interesse, quantificare l'apporto di materiale proveniente dai fiumi. Purtroppo però esistono delle difficoltà legate alla scarsità dei dati storici, alla realizzazione di rilievi effettivamente rappresentativi del fenomeno e all'individuazione di sezioni fluviali idonee alle misurazioni.

Va ricordato inoltre che il trasporto solido fluviale è di per se intrinsecamente complesso essendo composto da due fenomeni distinti:

- il trasporto torbido o in sospensione;
- il trasporto al fondo di materiale più grossolano.

Il primo riguarda il trasporto di sedimenti che sono trascinati in sospensione, solidali alla corrente.

Il secondo riguarda il trasporto di materiale solido sul fondo dell'alveo con movimenti rotatori o di strisciamento.

In genere in un bacino idrografico si individuano tre zone principali:

- una zona di produzione dei sedimenti;
- una zona di trasporto dei sedimenti;
- una zona di deposito.

La prima coincide con la parte più a monte del bacino dove prevalgono processi erosivi.

La seconda ha il compito di trasportare a valle i sedimenti prodotti a monte, una parte dei quali resterà depositata lungo il percorso e mobilitata eventualmente in seguito.

La terza corrisponde alla zona terminale del bacino.

Si può affermare che il trasporto dei sedimenti è direttamente proporzionale alla loro dimensione: le particelle più fini, come le argille, hanno bisogno di un flusso anche di bassa energia per essere trasportate; le particelle più grossolane, saranno mobilitate solamente da portate elevate.

Durante il loro percorso, i materiali subiscono una diminuzione della loro granulometria, dovuta a:

- abrasione meccanica dei clasti attuata durante la fase di trasporto e in cui le particelle sono soggette oltre che al trasporto, alla collisioni tra loro;

- trasporto selettivo che si compone di un'azione di inizio del trasporto selettivo, durante il quale solamente la frazione dei sedimenti d'alveo inferiore al diametro critico si muove, e di una fase di trasporto differenziale, in cui i clasti più piccoli sono trasportati velocemente e più lontani dei grandi.

Per capire fisicamente come avviene il fenomeno del trasporto solido, ci si rifà ad un criterio che spiega il trasporto di una corrente solida, prendendo in considerazione il moto di una singola particella: il criterio di Shields.

Affinché possa realizzarsi uno spostamento, ogni singolo grano di sedimento deve essere turbato dal suo stato d'equilibrio.

Una generica particella adagiata sul fondo, è sottoposta alle seguenti forze (figura 1.9):

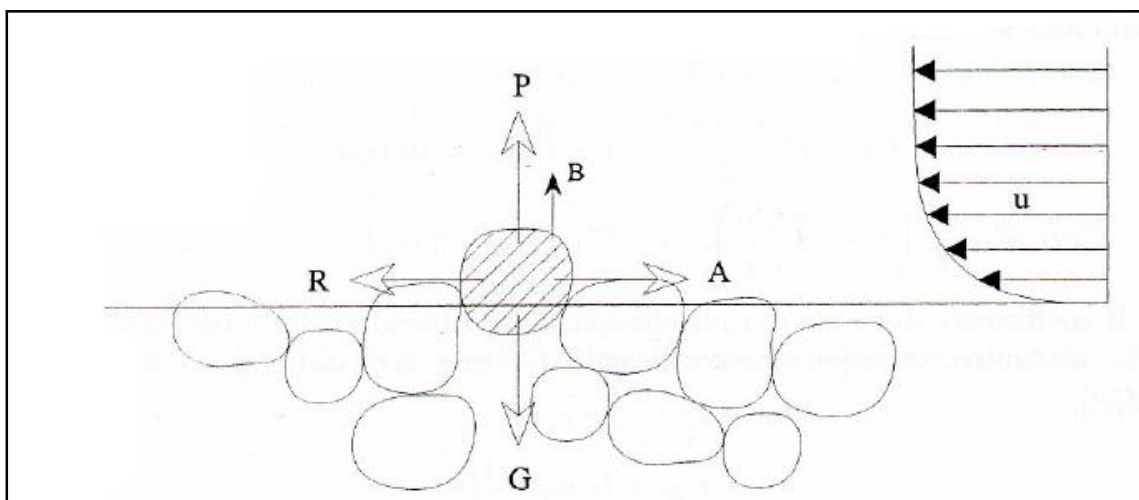


Figura 1.9: Azioni agenti su un grano

- peso immerso: **G**, riferito ai singoli granelli del fondo;
- portanza della corrente: **P**, diretta perpendicolarmente alla direzione della corrente fluida;
- spinta di galleggiamento: **B**;
- forza di trascinamento della corrente: **R**, forza idrodinamica che la corrente esercita parallelamente al fondo sui singoli grani.
- forza d'attrito: **A**, risultante dall'azione di contatto tra le particelle e le sue vicine;

Per determinare le condizioni di moto incipiente secondo Shields, bisogna eseguire un bilancio delle sole componenti parallele al fondo:

$$R = C_D \cdot u^2 \cdot \rho \cdot A$$

$$A = f \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot V$$

dove:

- $\rho$ : densità dell'acqua ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\gamma$ : peso specifico dell'acqua ( $\gamma_s$  delle particelle), in  $\text{N/m}^3$ ;
- $C_D$ : coefficiente di resistenza idrodinamico, che dipende dalla forma delle particelle e dal numero di Reynolds della corrente ( $Re = u \cdot d/\nu$ )
- $f$ : coefficiente d'attrito che dipende dalla forma e natura delle particelle;
- $A$ : area trasversale del grano ( $\alpha d^2$ , con  $\alpha$  coefficiente di forma) ;
- $V$ : volume del grano ( $\alpha d^3$ , con  $\alpha$  coefficiente di forma).

Adottando la legge di distribuzione logaritmica di velocità di Prandtl- von Karman del moto turbolento, si riconosce che la velocità della corrente  $u$  può essere espressa come funzione della velocità d'attrito  $u^*$  ( $u^* = \sqrt{(\tau/\rho)}$ ) e del Reynolds d'attrito ( $Re = u^* \cdot d/\nu$ ).

In condizioni di movimento incipiente la componente dinamica e quella attritiva si equivalgono,

$$\begin{aligned}
 R &= C_D \cdot (u^* f(Re^*))^2 \cdot \rho \cdot \alpha \cdot d^2 \\
 A &= f \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot \alpha \cdot d^3 \\
 R &= A \\
 C_D \cdot f(Re^*)^2 \cdot u^{*2} \cdot \rho \cdot \alpha &= f \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot \alpha \cdot d \\
 \frac{\tau_{crit}}{(\gamma_s - \gamma)d} &= g(Re^*) \\
 \frac{\tau_{crit}}{(\gamma_s - \gamma)d} &= \psi
 \end{aligned}$$

Attraverso la formula si può entrare nell'abaco ottenuto sperimentalmente da Shields, caratterizzato da una curva che separa la zona di mobilità da quella di stabilità dei grani: i punti al di sotto della curva rappresentano le particelle che la corrente non è in grado di trasportare, i punti al di sopra della curva rappresentano invece le particelle in movimento.

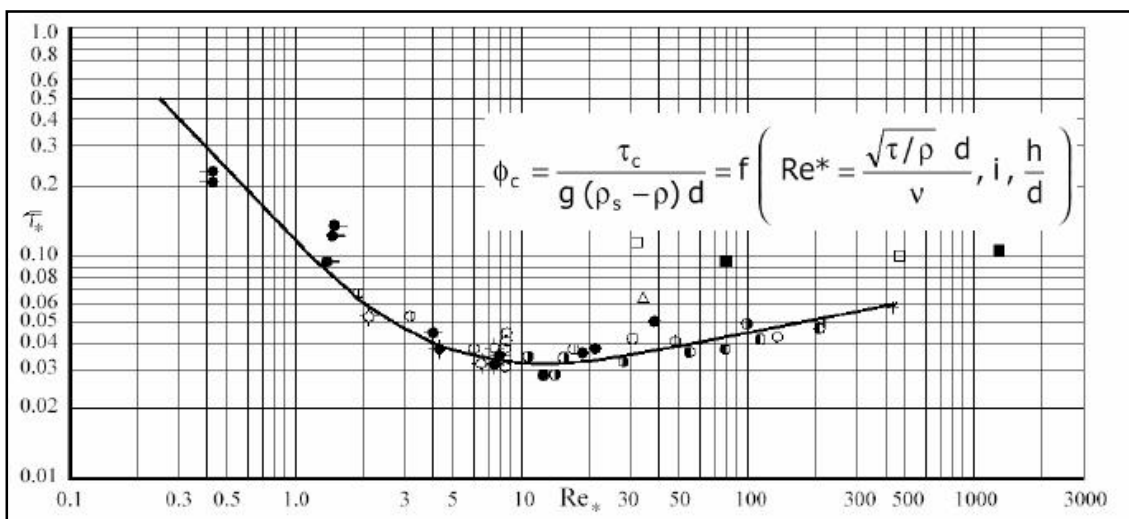


Figura 1.10: Curva di Shield

La velocità critica delle particelle è indipendente dal diametro delle particelle, mentre dipende dalla viscosità del fluido.

Quando il numero di Reynolds del grano tende a zero, si può avere movimento delle particelle solo se il loro diametro è sufficientemente piccolo. Questo implica un moto di tipo viscoso in cui il fondo dell'alveo tende ad essere ricoperto da una poltiglia di materiale molto sottile.

Per valori del numero di Reynolds grandi, le condizioni di mobilità del grano sono indipendenti dalla viscosità del fluido: il regime è simile ad un moto turbolento.

La riduzione del trasporto solido, rappresenta oggi la principale causa di erosione delle spiagge della Regione Emilia-Romagna.

Studi hanno evidenziato, alla fine degli anni '70, una diminuzione del trasporto solido di 3-4 volte rispetto alla condizione degli anni '40, in cui si poteva ritenere che i bacini fluviali non avessero ancora subito pesanti interventi quali: regimazione dei corsi d'acqua, controllo dell'erosione dei versanti, mutamento dell'uso dei suoli ed escavazioni in alveo.

Grazie ad azioni promosse dalla Regione, quali il blocco delle estrazioni di materiali inerti dagli alvei fluviali e il blocco delle escavazioni lungo il Po, si è potuto osservare l'andamento nel tempo del fenomeno:

- i corsi d'acqua direttamente afferenti in Adriatico, con esclusione del Po, nella prima metà degli anni '50 portavano mediamente 2,1 milioni di t/anno di materiale sabbioso;



- tale quantitativo si sarebbe ridotto progressivamente fino a raggiungere il valore minimo di 0,6 milioni di t/anno;
- con l'arresto delle estrazioni di inerti dagli alvei, gli apporti sarebbero cresciuti fino a raggiungere il valore medio di poco meno di 1 milione di t/anno;
- per il futuro si prevede un incremento del trasporto di sabbia pari a 1,4 milioni di t/anno per il 2015.

Per quanto riguarda il contributo del Po si è dedotto un andamento nel tempo da 4,5 milioni di t/anno nel 1940, a 1,3 milioni di t/anno nel 1980. Anche in questo caso l'azione di controllo, ha portato ad un incremento del trasporto solido a mare, dai 1,5 milioni di t/anno nel 1990 a 1,8 milioni di t/anno nel 2010.

I fiumi dunque, continuano a portare al mare grandi quantità di limo e argilla e, in misura minore, sabbia fine. Per quel che riguarda la variazione della linea di riva si evidenziano avanzamenti dietro le scogliere di Cattolica, a nord della foce del Marecchia fino a Viserba e a nord della foce del Savio.

Nessun riscontro alla foce dei Fiumi Uniti, a cause degli elevati tassi di subsidenza. Anche davanti alla Sacca di Goro non si hanno significativi miglioramenti, anzi in alcuni punti la situazione dello scanno è addirittura peggiorata.

Essendo l'apporto solido fluviale il "motore" che può garantire l'equilibrio delle spiagge, non è sufficiente limitarsi al tentativo di misurarne l'entità, ma si deve agire per riattivarne la crescita.

### 1.3 Opere di Rigidità di Difesa dall'Erosione

Una prima classificazione delle opere di difesa della costa dall'erosione è data da *opere naturali* e *opere artificiali*.

Tra le opere di difesa naturali ricordiamo le *spiagge* e le *dune*. Le dune rappresentano, oltre che una naturale difesa, anche una fonte di approvvigionamento di sabbia utile al ripascimento naturale delle spiagge. Esse occupavano in passato gran parte della fascia costiera emiliano-romagnola; oggi restano solo 34 km sui 130 km di estensione del litorale.

Tra le opere di difesa artificiali possono classificare:

- le *opere protettive*, dette anche *hard*;
- le *opere di rifornimento artificiale di sabbia*, dette anche *soft*.

Le opere protettive hanno la funzione di impedire l'azione erosiva del moto ondoso e di sostenere il terreno a tergo mediante il rivestimento. Esse si distinguono in:

- opere di difesa *radenti*;
- opere di difesa *distanziate parallele alla costa*;
- opere di difesa *poste ortogonalmente alla linea di riva*

Le opere soft, servono a controbilanciare le perdite causate dai processi naturali o da interventi dell'uomo.

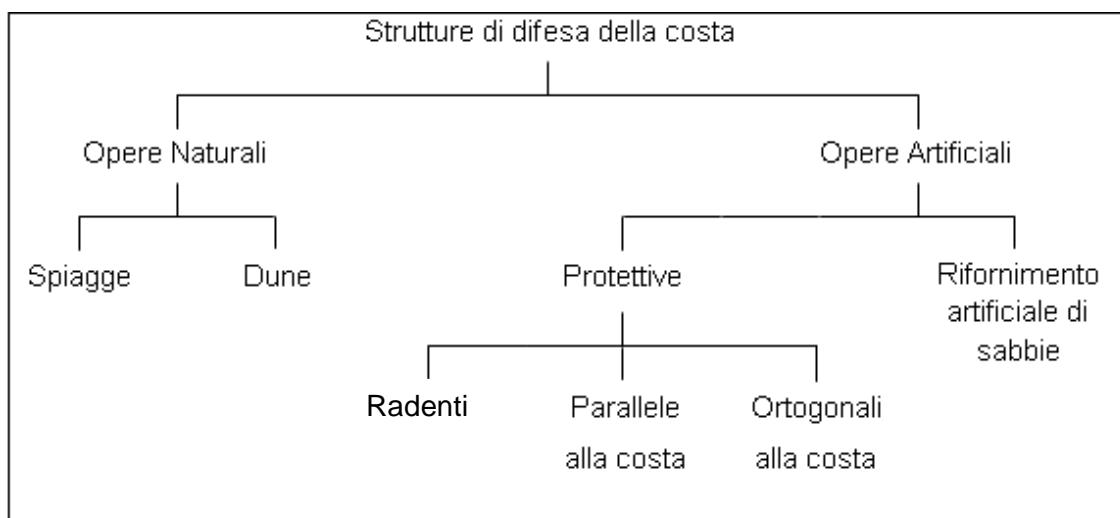


Figura 1.11: Tipologia delle strutture di difesa della costa

### **1.3.1 Opere Artificiali Protettive**

Le opere protettive, hanno la funzione di difendere la costa dall'azione erosiva del mare.

Le tipologie sono tre: opere aderenti, parallele e ortogonali alla costa.

Le opere radenti sono particolarmente indicate nelle zone caratterizzate dall'assenza di infrastrutture turistiche o in particolari situazioni di emergenza.

Le opere parallele alla costa, siano esse emerse o sommerse, hanno lo scopo di ridurre l'energia ondosa.

Le opere ortogonali alla costa sono utilizzate per stabilizzare i tratti di litorale in cui è notevole l'intensità del trasporto solido lungo riva. L'effetto dei pennelli è infatti quello di interrompere in parte o totalmente la deriva dei sedimenti, secondo la lunghezza dell'opera stessa e del materiale di cui sono costituiti.

In Figura sono riportati i tratti protetti e quelli non protetti con opere di difesa rigide aggiornato all'anno 2007 del litorale Emiliano-Romagnolo. In pratica, all'anno 2007, 74 km dei circa 130 km del litorale, risultano protetti da opere di difesa rigida. Di queste opere ben 66 km sono realizzate con massi rocciosi.

### **1.3.2 Opere Radenti**

Le opere di difesa radenti sono utilizzate laddove vi siano situazioni di rischio per infrastrutture stradali e ferroviarie, o per edifici urbani situati in prossimità della costa, o per difendere l'entroterra da inondazioni nel corso di mareggiate o in corrispondenza di tratti caratterizzati da forti escursioni di marea.

Sono in genere interventi economici e limitati ai tratti in erosione.

Si classificano in:

- paratie;
- muri di sponda;
- rivestimenti

Questi tipi di strutture richiedono una continua manutenzione e possono essere soggette al pericolo di sfiancamento ai lati se non adeguatamente protetti.

Esse tuttavia non creano svantaggi alle spiagge limitrofe, se si esclude il mancato arrivo sottoflutto del materiale che prima veniva eroso.

Va detto inoltre che l'erosione della spiaggia protetta non è completamente bloccata da questo tipo di intervento, anzi vi è il rischio che essa possa essere incrementata, sia pure limitatamente alla parte di spiaggia sommersa antistante l'opera di difesa. Ciò avviene in quanto la presenza della struttura, impedendo all'onda di propagarsi oltre verso terra, la costringe a frangere, dissipando quasi tutta l'energia residua e riflettendone una parte. In questo modo, l'onda va ad aggredire la base della struttura creando uno scalzamento al piede dannoso per la stabilità e l'integrità della struttura stessa. Per questa ragione la base di tale opere deve essere curata e rinforzata adeguatamente.

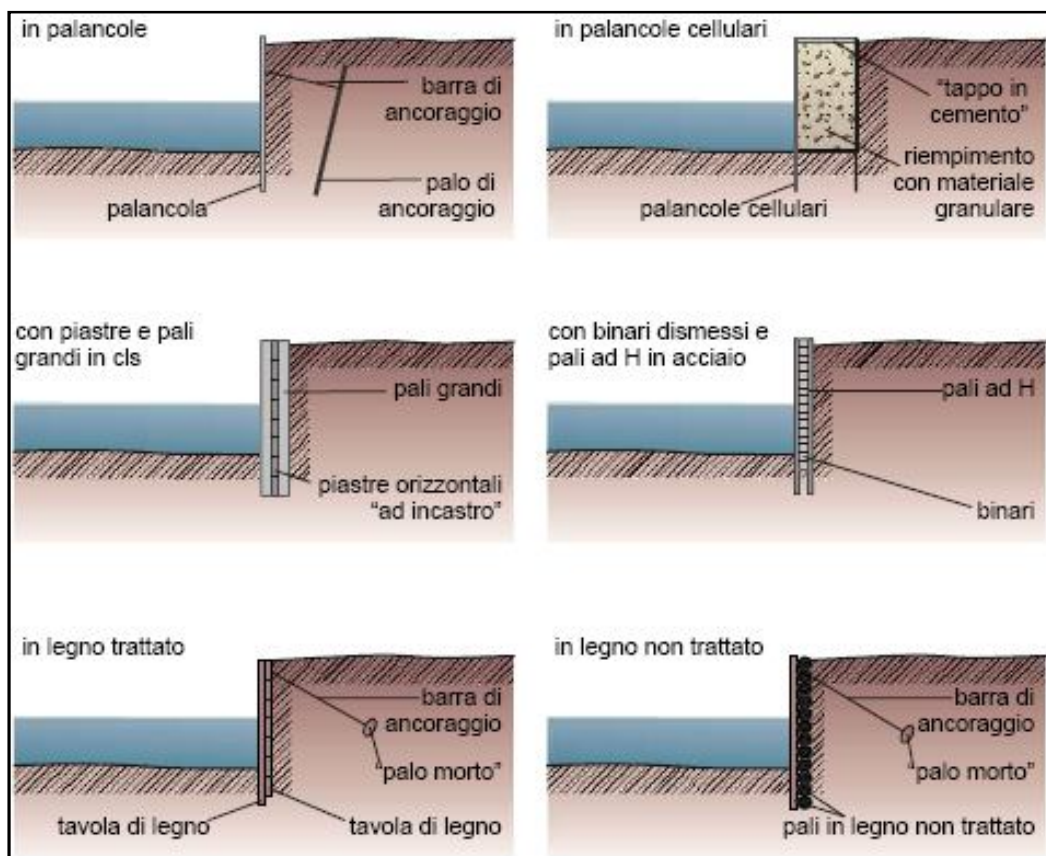
Le applicazioni di queste tipologie di opere lungo il litorale Emiliano-Romagnolo (figura 1.12) si trovano nei comuni di Misano, Ravenna, Comacchio e Goro e precisamente nel tratto compreso tra la Foce Lamone e Casal Borsetti (1,8 km), a protezione dell'area del poligono militare di Foce di Reno (4 km), di fronte alla Pineta di Volano (1,6 km) e a protezione dei terreni posti a quote inferiori al livello del mare del comune di Goro (10,4 km).

<b>Località</b>	<b>Lunghezza tratto protetto (m)</b>
Misano	220
Foce Fiumi Uniti Nord	350
Foce Lamone-Casal Borsetti	1.750
Foce Reno	4.000
Bocche del Bianco	1.000
Pineta di Volano	1.700
Sacca di Goro	10.400
<b>Totale</b>	<b>19.420</b>

*Figura 1.12: Scogliere radenti lungo il litorale emiliano - romagnolo*



*Figura 1.13: Scogliere radenti di Misano Adriatico*



*Figura*

*1.14: Esempi di paratie*

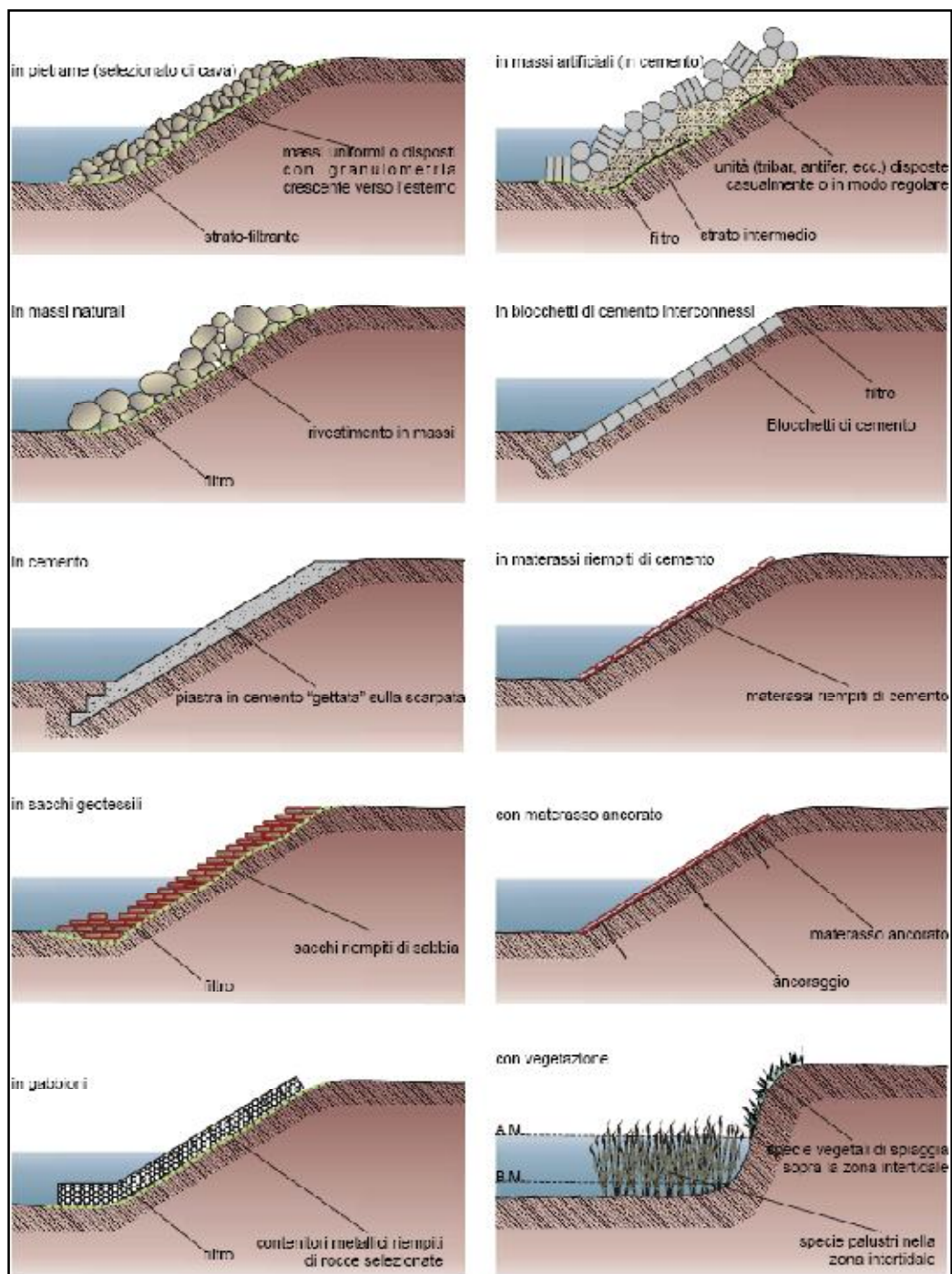


Figura 1.15: Tipologia di rivestimenti



### 1.3.3 Opere Parallele alla Costa

Sono opere create per far sì che l'onda in arrivo sulla costa non vada a frangere su di essa ma al largo, sulla struttura appositamente realizzata. Sono opere realizzate con scogli di cava o massi artificiali gettati in cumulo su fondali mediamente bassi, parallelamente alla battigia e a una certa distanza da questa. Poiché l'interesse difensivo è limitato alle onde più alte e ripide, cioè erosive, la tendenza costruttiva è di realizzare strutture poco elevate sul livello del mare o addirittura anche al di sotto di esso (barriere sommerse), in modo da permettere ad un certo numero di onde di scavalcare la barriera e giungere, ormai prive di energia, alla battigia.

Nella maggior parte dei casi le scogliere sono realizzate ad asse principale parallelo, o poco inclinato, rispetto alla linea di riva e sono separate tra loro da varchi per consentire il ricambio dell'acqua nella zona protetta.

E' importante notare la differenza di effetti prodotti da una barriera emersa rispetto ad una barriera sommersa o semi sommersa. Infatti la prima non consente il ritorno della massa d'acqua tracimata se non attraverso i varchi e tramite una trascurabile componente di filtrazione, le altre due tipologie invece permettono una parte consistente del flusso di ritorno al di sopra della cresta dell'opera.

Nel litorale Emiliano-Romagnolo la tipologia di opere maggiormente utilizzata è quella di scogliere parallele emerse (*figure 1.16 - 1.18*). Durante la redazione del Piano Coste è però emersa la preponderanza degli effetti negativi prodotti da queste opere rispetto a quelli positivi. In tutte le zone in cui sono state realizzate le scogliere, sono emersi, nel breve e medio periodo un sicuro effetto di stabilizzazione del litorale protetto, ma effetti negativi sul litorale adiacente e sulla qualità delle acque e dei fondali compresi tra scogliera e battigia.

Infatti nelle zone sottoflutto a quelle protette, la capacità di trasporto dei sedimenti resta immutata, mentre l'alimentazione proveniente dalla zona protetta è drasticamente ridotta dalla presenza delle scogliere che intercettano parte del trasporto long shore ed impediscono alla spiaggia protetta di cedere materiale.

Va sottolineato inoltre ciò che accade all'interno della zona protetta: la dissipazione dell'energia indotta dalle barriere provoca la sedimentazione del materiale fino a tergo delle stesse, oltre alla cattura di sostanze inquinanti. Inoltre, durante le mareggiate, le veloci correnti di ritorno verso largo, che si hanno attraverso i varchi, causano il rapido

approfondimento dei fondali, se di materiali facilmente erodibili. Tale fenomeno risulta molto pericoloso per i bagnanti ( buche e correnti di ritorno non previste) e comporta inoltre una forte instabilità alle testate degli elementi della barriera.

Per assicurare un miglior ricambio di acqua nella zona interna, si è pensato di rendere tracimabile la barriera in ogni condizione di mare, portando la cresta della struttura a quota inferiore o pari a quella della bassa marea ( *figura 1.19 e 1.20*).

L'utilizzo di tali barriere si è diffuso in Italia a partire dalla prima metà degli anni '80.

<b>Località</b>	<b>Lunghezza tratto protetto (m)</b>
Cattolica	2.100
Misano	700
Rimini-Cesenatico	19.000
Lido di Savio	2.100
Lido di Classe	1.200
Lido Adriano	2.700
Casal Borsetti	1.300
Porto Garibaldi - Lido delle Nazioni	9.000
<b>Totale</b>	<b>38.100</b>

*Figura 1.16: Scogliere parallele emerse lungo il litorale emiliano-romagnolo*



*Figura 1.17: Scogliere parallele emerse a Misano Adriatico, in tale immagine si può notare la formazione di tomboli*



*Figura 1.18: Scogliere parallele emerse a Bellaria – Igea Marina*

Località	Lunghezza tratto protetto (m)	Anno di costruzione
Porto Verde	150	2003
Igea Marina	800	2003
Savignano	100	2000
Cesenatico	800	2002
Lido di Classe Nord	150	1989
Lido di Dante	800	1995
Lido Adriano-Punta Marina	3.800	2001-2006
Casal Borsetti Nord	100	1989
<b>Totale</b>	<b>6.700</b>	

*Figura 1.19: Scogliere parallele semisommerse lungo il litorale emiliano - romagnolo*



*Figura 1.20: Scogliere parallele semisommerse a Punta Marina*

I parametri di progetto di una struttura parallela sono essenzialmente:

- la larghezza della cresta, importantissima per via del frangimento che vi avviene sopra;
- la larghezza della protezione al piede (specialmente lato riva);
- l'ampiezza dei varchi ( se la barriera non è puntuale ma inserita in una serie di opere di protezione);
- la distanza delle barriere stesse dalla riva.

Quest'ultimo aspetto, soprattutto nelle strutture a cresta alta, determina l'insorgere di forme geomorfologiche note come *tomboli* e *salienti*: questi sono dovuti alla riduzione della velocità dell'onda e di conseguenza del materiale solido che essa trasporta, combinata alla diffrazione che avviene al varco della barriera stessa.

Se lo scopo della barriera è anche quello di estendere la spiaggia, queste formazioni possono essere senz'altro di aiuto. Purtroppo però la formazione di tali elementi può provocare il ristagno dell'acqua e di conseguenza problemi igienici relativi al riciclo idrico.

Per quanto riguarda l'ampiezza dei varchi, è importante tener presente in fase progettuale che un'eccessiva apertura riduce la protezione offerta dalle scogliere e che una larghezza esigua ostacola la circolazione dell'acqua accentuandone gli effetti negativi legati alla qualità.

L'interazione tra l'onda e la struttura fa sì che una parte dell'onda incidente tracimi, una parte venga riflessa, una parte percoli all'interno della struttura e una parte passi per filtrazione. La barriera, quindi, ferma una parte di moto ondoso, mentre trasmette, a seconda di come è stata costruita, un'agitazione ondosa residua lato riva.

A parità di altezza d'onda incidente l'altezza dell'opera fa variare l'altezza d'onda trasmessa. Definita  $R_c$  l'elevazione dell'opera rispetto al medio mare e  $H_{si}$  l'altezza dell'onda incidente il parametro:

$$\frac{R_c}{H_{si}}$$

da indicazioni sulla probabilità di tracimazione.

L'onda risale sulla barriera, e in parte viene trasmessa lato riva. La risalita dell'onda è funzione di diversi fattori quali:

- la scabrezza e la permeabilità della struttura;
- l'obliquità delle onde;
- la presenza di una berma;
- l'inclinazione del paramento.

Quantificare l'onda trasmessa è molto importante per capire cosa succede a riva in termini di erosione, sicurezza per la balneazione e grado di protezione delle specie marine.

Il coefficiente di trasmissione  $K_t$  è dato dal rapporto tra onda incidente ed onda trasmessa. Tale coefficiente si distingue a seconda della struttura in esame.

Le formule ottenute da Van der Meer et al. (2005) per strutture di tipo permeabili sono due:

- quando il rapporto tra la larghezza della cresta e l'altezza dell'onda incidente è minore ad  $1/10$  cioè per strutture a cresta stretta, vale la formula di D'Angremond
- quando tale rapporto è maggiore a  $1/10$  cioè per strutture a cresta larga vale la nuova formula messa a punto:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = -0.4 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.64 \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} (1 - e^{0.5\xi}) \quad \text{strutture a cresta stretta}$$

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = -0.35 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.51 \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.65} (1 - e^{0.41\xi}) \quad \text{strutture a cresta larga}$$

dove  $H_{si}$  è l'altezza d'onda significativa incidente,  $R_c$  è la sommergezza,  $B$  è la larghezza della cresta e  $\xi$  è il parametro di Iribarren e Battjes.

Comunque sia, entrambe le formule sono limitate inferiormente e superiormente:

- la prima da 0,07 a 0,80;
- la seconda da 0,05 a  $0,93 - 0,006(B/H_i)$ .

Anche se è sconsigliato realizzare strutture lisce e impermeabili, valgono le seguenti formule fornite sempre da Van der Meer et al. (2005):

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = -0.3 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.75(1 - e^{0.5\xi})$$

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = -0.3 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.75 \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.65} (1 - e^{0.41\xi})$$

- La prima vale quando  $\xi < 3$ ;
- la seconda vale quando  $\xi > 3$ .

Entrambe le formule presentano minimo di 0,075 e massimo pari a 0,8. Si noti che nella prima formula si perde la dipendenza del coefficiente di trasmissione dalla larghezza della base.

Lo scontro tra onda e barriera porta a modificare anche l'angolo di incidenza nonché lo spettro ondoso. Per quanto attiene alle strutture impermeabili appena menzionate, si traduce in una correzione empirica del coefficiente di trasmissione

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left[ -0.3 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.75(1 - e^{0.5\xi}) \right] (\cos\beta)^{2/3}$$

dove  $\beta$  è l'angolo di incidenza. Tale formula ha validità per  $0 < \xi < 3$ ,  $0 < \beta < 70^\circ$  e per  $1 < B/H_{si} < 4$ . Tuttavia i recenti risultati mettono in luce che l'incidenza di onde con una certa obliquità non sortisce alcun cambio di direzione all'onda trasmessa per quanto attiene strutture impermeabili e lisce. Diverse considerazioni si hanno per strutture porose: i risultati di laboratorio hanno messo in luce che l'onda trasmessa ha un'obliquità ridotta dell'80% cioè:

$$\beta_t = 0.8\beta_i$$

Ora, il coefficiente di trasmissione è indice della sola altezza d'onda ma è lo spettro ondoso che contiene le informazioni sul periodo o sulla frequenza. Sulla scorta di rilevazioni dello spettro trasmesso, Van der Meer ne propose nel 2000 un modello il quale contiene il 60% dell'energia per frequenze che sono comprese tra 0 e  $1,5f_p$  se  $f_p$  è la frequenza di picco e il restante 40% è distribuita tra  $1,5f_p$  e  $3,5f_p$ . Le conclusioni tuttavia sono basate su un numero ristretto di osservazioni.

Una parte dell'onda viene riflessa, portando ad effetti di erosione localizzata nei pressi del piede della struttura. Le formule per determinare il coefficiente di riflessione sono diverse e si distinguono in base alle caratteristiche dei materiali delle opere, in tutte le formule però si nota una dipendenza dal parametro di Irribarren e Battjes. Zanuttigh e Van der Meer (2006) hanno sviluppato una nuova formula che è in grado di rappresentare con la sua forma le diverse tipologie di strutture:



$$K_r = \tanh(a \xi_o^b)$$

Dove  $a$  e  $b$  assumono valori diversi a seconda che le strutture siano lisce ed impermeabili, in massi con nucleo impermeabile e in massi con nucleo permeabile. Gli stessi autori hanno messo in relazione i due parametri con la scabrezza e la permeabilità della struttura.

La quota parte di onda che attraversa la struttura per filtrazione è almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella che passa per tracimazione. Se la struttura è molto emersa, quindi scarsamente tracimata, la direzione dell' acqua che passa per filtrazione va da riva verso largo al contrario se la struttura è spesso tracimata la filtrazione andrà da largo verso riva, infatti la tracimazione richiede meno energia rispetto alla filtrazione. Solitamente si considera la filtrazione al fine di valutare i livelli di crescita degli organismi viventi e degli organismi colonizzatori dei pori all'interno dell'opera, quindi è un parametro che assume importanza dal punto di vista ecologico più che da quello progettuale.

### 1.3.4 Opere Ortogonali alla Costa

L'effetto principale di tali opere, dette *pennelli*, è quello di interrompere parzialmente o totalmente, a seconda della loro lunghezza, altezza sul livello del medio mare e del materiale di cui sono costituiti ( massi, legno, cemento,...), il trasporto lungo riva delle sabbie. In questo modo si assicura al tratto di spiaggia protetto la quantità di materiale necessario al mantenimento delle dimensioni della spiaggia.

Assumendo per semplicità che il trasporto avvenga fino all'ascissa  $x_c$  corrispondente alla profondità di chiusura  $h_c$ , allora, tanto più la lunghezza del pennello si avvicina ad  $x_c$ , tanto più sarà efficace nell'intercettare il materiale in movimento.

Tuttavia, oltre ad un certo limite, l'incremento dell'efficacia, si riduce notevolmente in rapporto a quello dei costi di costruzione, perciò la lunghezza dei pennelli è solitamente inferiore ad  $x_c$ .

L'alterazione dei naturali processi morfodinamici e l'interazione delle onde con le strutture, generano inoltre un andamento della linea di riva noto come “spiaggia a denti di sega”, poiché per effetto del gradiente dell'altezza d'onda e della riflessione, si verificano deposito sopraflutto e erosione sottoflutto, con preponderanza del secondo



effetto dovuta al fatto che il deposito avviene a profondità sempre maggiori, mentre l'erosione agisce su fondali progressivamente meno profondi.

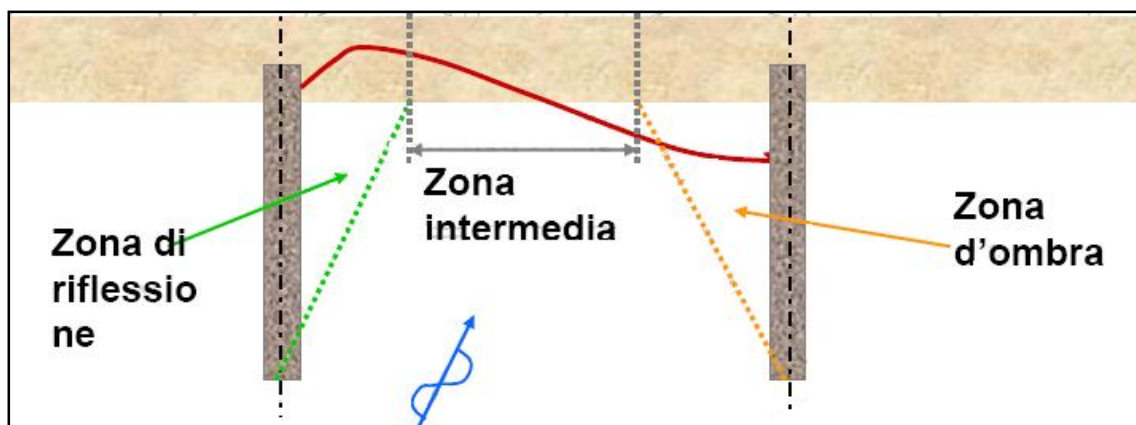
Molto importante è ammorsare a terra la radice del pennello al fine di evitare il suo aggiramento e sfiancamento da parte dell'onda.

La costruzione dei pennelli avviene nel rispetto delle seguenti fasi:

- posa in opera del primo pennello lato sottoflutto;
- posa in opera in successione degli altri pennelli verso il lato sopraflutto.

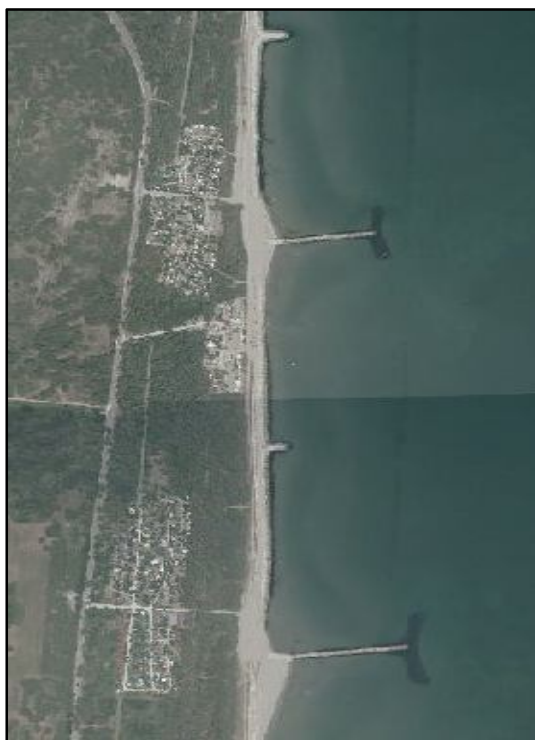
Un altro parametro di rilievo è la distanza tra i pennelli: se i pennelli sono molto distanti non si assicura il completo riempimento della zona interposta, se al contrario sono troppo vicini sono antieconomici. Solitamente la distanza tra due pennelli è di circa due, tre volte la lunghezza dell'opera stessa, quindi, oltre alla zona d'ombra in cui si ha erosione ed a quella di riflessione in cui si ha deposito, c'è un tratto centrale in cui la spiaggia tende a disporsi perpendicolarmente alla direzione prevalente dell'onda, ovvero a quella direzione di provenienza traccia del piano in cui il trasporto solido è mediamente nullo (*figura 1.21*).

L'impiego dei pennelli è utile anche quando si realizza una spiaggia con versamento artificiale. In tal caso, un sistema di pennelli tende a ridurre l'esportazione di materiale per effetto della deriva litoranea e quindi a limitare la necessità periodica di versamenti.



*Figura 1.21: Zona di riflessione, erosione e intermedia*

Realizzando a T la testata del pennello si ostacola il trasporto verso il largo causato dalla deviazione della corrente provocata dal pennello ed induce il deposito dei sedimenti in prossimità della T (*figura 1.22*).



*Figura 1.22: Pennelli a T, Casal Borsetti Nord*

Nella tabella seguente sono riportati tutti i pennelli trasversali presenti lungo il litorale regionale, ad esclusione dei moli portuali e di quelli ai lati delle foci dei fiumi.

Località	Lunghezza tratto Protetto (m)	N° pennelli	Note
Cattolica		1	Chiusura lato Nord delle scogliere
Porto Verde		2	Ai bordi esterni della pocket beach
Misano	1600	26	Lunghi 60 m e con interasse di 60 m
Igea Marina		2	A chiusura intervento sperimentale
Valverde		5	Al retro di scogliere parallele emerse
Cesenatico Nord		4	1 molto consistente e 3 piccoli ravvicinati
Milano Marittima		2	In pali di legno filtranti
Lido di Classe Nord		2	Distanti 350 m + barriera in sacchi
Lido di Dante		3	1 due esterni sono prolungati fino alla scogliera
Punta Marina		12	7 sono prolungati fino alla scogliera semisommersa
Foce Lamone-Casal Borsetti		6	2 sono stati prolungati ed hanno la testa a T
Casal Borsetti Nord		2	Distanti 350 m + barriera in sacchi
Lido di Spina	250	5	In pali di legno accostati
Lido delle Nazioni		2	Al retro di scogliere
Volano	1000	15	In pali di legno accostati
Foce Po di Goro	150	2	A protezione del faro

*Figura 1.23: Pennelli trasversali lungo il litorale emiliano- romagnolo*

Pur assumendo un comportamento generalmente positivo nella protezione della zona in cui sono installati, i pennelli interrompono quasi completamente l'alimentazione verso l'area sottoflutto a quella protetta, impedendo così il reintegro del materiale eroso e determinando l'arretramento della linea di riva della spiaggia non protetta.

Questo effetto di “spostamento del problema” è comune a tutte le opere di difesa rigida e ne costituisce la principale controindicazione, insieme all'elevato impatto ambientale dovuto all'inserimento di materiali lapidei in una situazione di spiaggia sabbiosa, che ne stravolge completamente l'assetto.

## **CAPITOLO SECONDO**

*Il Ripascimento: il Problema della Fonte di Sabbia con  
Attenzione al Progettone dell'Emilia Romagna*

## 2.1 Introduzione

Come già visto, nel nostro paese le coste, che si sviluppano per circa 8000 km, rappresentano un'importante risorsa strategica: esse sono infatti fra le aree più densamente popolate e sono la sede di un'intensa attività economica principalmente legata ad insediamenti urbani, turistici, portuali e industriali. Al contempo, tali aree ospitano alcuni degli habitat più fragili e preziosi d'Europa. Lo sfruttamento crescente cui tali aree sono sottoposte, associato ad eventi naturali quali ad esempio le oscillazioni del livello del mare e l'incremento della frequenza e dell'intensità degli eventi atmosferici estremi, con conseguente aumento dei fenomeni erosivi, determinano il degrado delle risorse costiere. Oltre alle cause citate nel precedente capitolo, ulteriori fattori concorrono ad aumentare i fenomeni erosivi, quali: l'irrigidimento della linea di riva dovuto alla realizzazione di opere marittime ( che interferiscono con il trasporto longitudinale), l'immobilizzazione e lo spianamento delle dune, e non ultimo la rimozione della sabbia dalle spiagge dovuta al calpestio.

Storicamente per recuperare e difendere le spiagge dall'erosione si è intervenuti realizzando opere rigide trasversali (pennelli) e longitudinali (frangiflutti, difese aderenti e barriere) alla linea di riva. Tali interventi, pur riscuotendo ancor oggi pareri favorevoli in considerazione alla disponibilità di tecniche progettuali ben consolidate e di proiezioni di costo relativamente affidabili, presentano effetti indesiderati sotto il profilo ambientale e paesaggistico e, soprattutto, alterano in modo imprevedibile le dinamiche costiere su scala locale.

La difesa delle spiagge dal fenomeno dell'erosione marina ha subito una modificazione sostanziale nei primi anni '80, data dall'esigenza di abbandonare la difesa rigida e i suoi limiti, sia tecnici sia economici, rivolgendo la sua attenzione verso una nuova tecnica di intervento di tipo "soft", che può garantire una migliore risposta sotto il profilo ambientale, paesaggistico ed economico: il **ripascimento**.

Il ripascimento è un intervento di difesa costiera che consiste nel ricostruire la spiaggia erosa mediante l'impiego di materiale idoneo. Poiché tali attività comportano la movimentazione di milioni di mc di sedimento, oltre all'aspetto tecnico-progettuale ed economico, è fondamentale rivolgere l'attenzione agli aspetti ambientali, soprattutto in un ambiente ricco di emergenze naturalistiche come il bacino Mediterraneo.

## 2.2 Il Ripascimento

Il ripascimento è un intervento di difesa costiera che consiste nel ricostruire la spiaggia erosa mediante l'impiego di materiale di idonea qualità. Quest'ultimo può avere diverse provenienze:

- alvei fluviali;
- cave terrestri;
- ambiti costieri (dragaggio delle foci fluviali e dei canali navigabili);
- depositi marini (depositi di sabbie relitte).

Il ripascimento consente di minimizzare sia l'impatto ambientale, sia gli effetti negativi spesso associati all'uso di strutture rigide.

Prima di tutto è opportuno osservare che a causa della sua azione dinamica, il mare innesca una serie di continui processi di trasformazione morfologica delle spiagge che possono essere repentini e catastrofici o lenti e continui. La superficie di confine tra terra e mare è sempre soggetta a incessanti variazioni. La fascia attiva che interviene nei fenomeni erosivi non riguarda solamente la porzione di spiaggia emersa, ma anche parte di quella sommersa: infatti il materiale che costituisce l'habitat del litorale, è sempre in movimento sotto l'azione del moto ondoso e delle correnti marine.

Nell'arco dell'anno si possono individuare due configurazioni della fascia costiera in dipendenza dalle variazioni climatiche:

- assetto invernale: in occasione delle grandi mareggiate a causa delle quali avviene un arretramento del sedimento della spiaggia emersa a favore dei fondali antistanti con conseguente arretramento della linea di riva;
- assetto estivo: il sedimento sommerso tende ad avvicinarsi alla linea di riva con conseguente avanzamento di quest'ultima.

Un'opera di difesa costiera, deve tener conto della tendenza evolutiva della spiaggia su cui interviene, in modo da poter calcolare preventivamente l'inevitabile adattamento del nuovo profilo.

In particolare, per gli interventi di ripascimento la funzione di difesa è legata proprio all'irrobustimento, in termini di estensione, sia della porzione di spiaggia emersa, sia di quella sommersa, al fine di garantire una maggiore distanza tra l'azione diretta del moto



ondoso e gli elementi di interesse posti lungo il litorale a tergo della zona di ripascimento. E' quindi opportuno considerare che:

- il profilo imposto dalle operazioni di versamento è evidentemente innaturale ed è destinato ad essere rapidamente rimodellato fino ad assumere una conformazione di equilibrio dinamico naturale. L'assetto conclusivo della spiaggia potrà essere in prima approssimazione rappresentato da un profilo parabolico, la cui forma dipende essenzialmente dalle caratteristiche granulometriche dei sedimenti;
- la modifica del profilo di versamento comporta una ridistribuzione dei sedimenti in senso trasversale alla linea di riva, fino a una distanza individuata dalla profondità di chiusura, a sua volta correlata alle caratteristiche di esposizione del sito in esame e al clima ondoso;
- l'eventuale attacco oblique del moto ondoso incidente la zona di ripascimento, comporta una deriva naturale dei sedimenti, che tendono a migrare sottoflutto, determinando una perdita nel bilancio quantitativo del materiale versato.

Per l'analisi dei fenomeni erosivi e per il dimensionamento di dettaglio della sagoma di versamento e del profilo di esercizio, è quindi necessario condurre un'attenta analisi dei profili trasversali naturali del litorale in esame e della distribuzione granulometrica, sia per il materiale di ripascimento che per la sabbia già presente nella spiaggia erosa.

### **2.2.1 Criteri per la quantificazione del fabbisogno di sabbia**

Per poter individuare i giacimenti (dimensioni, caratteristiche, localizzazione), è necessario conoscere quanta sabbia, di che qualità e dove la stessa deve essere recapitata. La quantità di sabbia necessaria influenza infatti in modo fondamentale la programmazione e il dimensionamento degli interventi, la tipologia dei mezzi necessari, le tecnologie da utilizzare e il prezzo del materiale.

Si può far distinzione tra:

- la quantità di sabbia annualmente necessaria a compensare l'erosione nei tratti di litorale in arretramento;
- la quantità di sabbia per la ricostruzione dei litorali esposti storicamente all'erosione, fino al raggiungimento di determinate ampiezze preesistenti.

Queste quantità però, pur corrispondendo alle reali condizioni di perdita annuali o storiche, sono fabbisogni teorici che non corrispondono alle effettive quantità necessarie agli interventi di manutenzione e ricostruzione.

Possiamo far distinzione tra:

- *fabbisogno effettivo per la **manutenzione** (mc/anno)*: rappresenta la quantità annua di sabbia o inerte in genere necessario a compensare l'erosione nei soli tratti di litorale giudicati di interesse;
- *fabbisogno effettivo per la **ricostruzione** (mc)*: rappresenta la quantità di sabbia o inerte in genere necessaria alla ricostruzione dei soli litorali di interesse esposti storicamente all'erosione fino al raggiungimento di determinate ampiezze preesistenti.

Il calcolo dei fabbisogni di sabbia per la difesa delle coste richiede monitoraggi a grande scala, studio delle situazioni locali del ciclo sedimentario e scelte politiche per individuare i litorali più bisognosi di interventi di difesa.

E' importante anche il rilievo periodico delle variazioni morfologiche e sedimentologiche dell'area di interesse e l'analisi comparata di questi dati con le registrazioni di moto ondoso e dei livelli marini.

Conviene infine programmare una periodica attività di monitoraggio anche nel periodo successivo all'esecuzione dell'opera, con il preciso scopo di verificare su scala reale la fondatezza delle previsioni progettuali ed eventualmente realizzare le necessarie correzioni rispetto al preventivato programma di manutenzione.

## 2.2.2 Efficienza del Ripascimento

Per effettuare un ripascimento occorre considerare diversi fattori:

- identificazione del sito e del tratto di intervento;
- valutazione di quanta sabbia versare per metro lineare di spiaggia;
- tipologia di sabbia da utilizzare;
- cava di prestito
- valutazione sulla configurazione che il volume di spiaggia deve assumere;
- necessità di eventuali opere collaterali.

Per quel che concerne la granulometria della sabbia artificiale, occorre considerare che, nel caso di ripascimento uniforme:

- se il materiale ha un diametro con  $D_{n50}$  pari a quello della spiaggia allora il profilo di questa trasla verso largo;
- se la sabbia utilizzata è più grossolana dell'originale, nel momento della sua posa sulla battigia scivola via fino ad incontrare la spiaggia sottostante a granulometria più fine, provocando un irrigidimento del profilo risultante;
- se la sabbia utilizzata è più fine dell'originale, essa tende a scivolare in profondità andando a ripascere la spiaggia sommersa.

Siano  $A_N$  e  $A_F$  due parametri di scala dimensionali relativi al profilo nativo e a quello artificiale rispettivamente, rappresentativi del diametro caratteristico del materiale.

Si è detto che tanto più è grossolano il materiale da ripascimento, tanto più sarà larga la spiaggia emersa per unità di volume di sabbia versata. Si può tuttavia dimostrare che esiste un valore critico dell'avanzamento del profilo, cui corrisponde un volume critico di versamento, che discrimina il fatto che i due profili si intersechino o meno.

In figura 2.1 sono rappresentate le diverse tipologie di profilo ottenibili per diversi rapporti tra il diametro della sabbia nativa e di ripascimento, e di conseguenza, dei diversi parametri di scala.

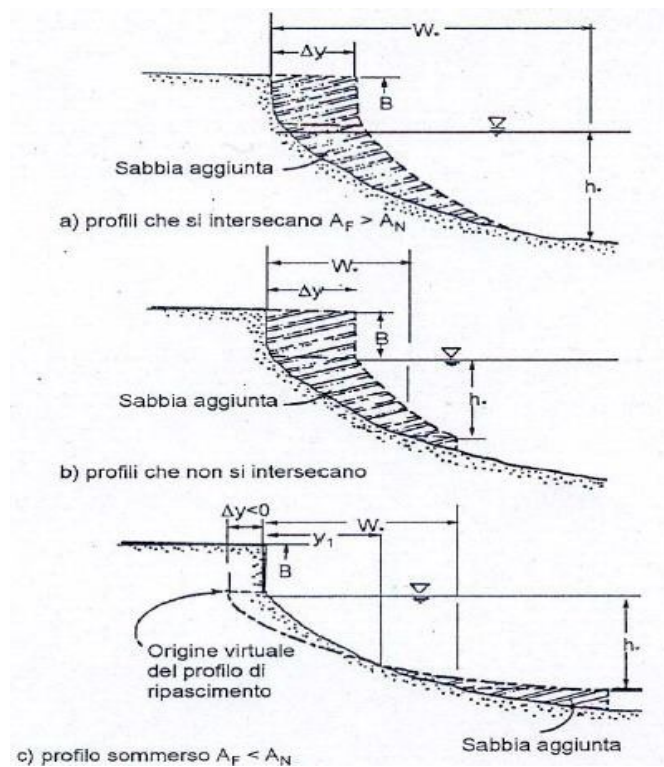


Figura 2.1 – profilo naturale e artificiale

Una valutazione preliminare del comportamento del profilo ripasciuto si può svolgere attraverso un abaco come quello mostrato in figura 2.2.

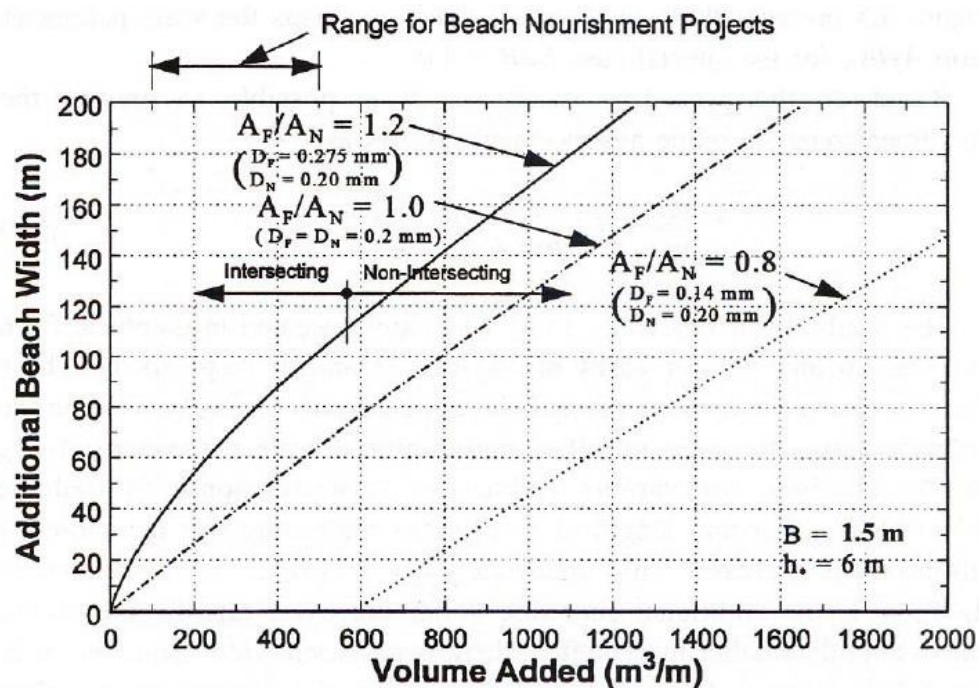


Figura 2.2 – abaco per la valutazione preliminare del profilo ripasciuto

Un altro fattore importante da analizzare è come avviene l'avanzamento della spiaggia, poiché se questo non è uniforme, cambia l'orientazione della spiaggia stessa e a parità di direzione delle onde al largo il loro angolo di incidenza.

Ipotizzando che la spiaggia sia in equilibrio pre-esistente, la deformazione della linea di riva può essere descritta mediante la formulazione seguente:

$$\frac{dy}{dt} - G \frac{d^2y}{dx^2} = 0$$

con:

$x$ : asse parallelo alla riva

$y$ : asse perpendicolare alla riva

$G$ : derivata della portata solida rispetto all'inclinazione delle onde, funzione quindi dell'altezza d'onda.

Assumendo la costante  $G$  positiva, la relazione vista è analoga all'equazione di diffusione del calore. Essa esprime il fatto che il trasporto cresce con l'obliquità delle onde sino a che questa raggiunge i  $45^\circ$ , per obliquità superiori decresce.

Introducendo una variazione lungo il profilo della spiaggia, la deformazione della linea di riva può essere descritta mediante la valutazione dei momenti  $M_n$ , dove

$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} y(x) \cdot x^n \cdot dx$  rappresenta il generico momento di ordine  $n$ . In questo modo

$\mu = M_1/M_0$  è la posizione media in cui si trova la massa di sabbia, fornendo lo spostamento nel tempo del cumulo, mentre  $\sigma^2 = M_2/M_0$  rappresenta la dispersione del profilo lungo la spiaggia.

Derivando l'espressione del momento generico nel tempo, considerando la relazione precedente e ipotizzando che la perturbazione sia locale, ovvero l'immissione di materia sia puntuale, si ottiene la relazione

$$\frac{\partial M_n}{\partial t} = G \cdot n(n-1) \cdot M_{n-2}$$

rappresentativa del fatto che il volume resta costante ( $n=0$ ), la posizione media del deposito non si sposta ( $n=1$ ) e la dispersione cresce col tempo ( $n=2$ ) convergendo lentamente, come  $t^{-1/2}$  alla distribuzione normale.

In realtà il versamento non è puntuale ma interessa una certa estensione. Ipotizzando un versamento costante su un tratto di lunghezza  $l$  si osserva come la spiaggia si allarga, il profilo si disperde e tende anch'esso ad una distribuzione normale.

In questo caso ci interessa trovare un indicatore che renda l'efficienza del ripascimento sostenuta. Tale indicatore è dato dal rapporto tra la sabbia che resta nella zona e quella versata e diminuisce ovviamente con il tempo. Pertanto, fissata una durata dell'intervento lungo una certa spiaggia (caratterizzata da una certa altezza d'onda  $H_s$  e quindi da un dato  $G$ ) emerge che l'efficienza è tanto maggiore quanto più grande è  $l$ . L'indicatore che assumiamo si riferisce al tempo in cui il volume apportato viene dimezzato, ed è noto come **tempo di emitiva**,  $t_{50}$ . La sua espressione è:

$$t_{50} = 0.21 \frac{l^2}{G}$$

Se si esprime  $G \propto \frac{H_b^{5/2} \sqrt{g}}{h_s}$  e si misurano  $t_{50}$  in anni,  $l$  in km,  $H_b$  in m diviene:

$$t_{50} = 0.172 \frac{l^2}{H_b^{5/2}}$$

### 2.2.3 Modalità di Ripascimento

Il ripascimento può essere effettuato con materiale proveniente da differenti siti:

- cave di terra;
- cave sottomarine (sabbie relitte);
- residui (ad esempio dal dragaggio di darsene portuali)
- alvei fluviali.

Se il ripascimento avviene da terra è effettuato mediante camion o con condotte by-pass delle sabbie.

Se il ripascimento avviene via mare è effettuato tramite dragaggio e trasferimento in sabbiodotto o attraverso il lancio con bettolina.





*Figura 2.3 – intervento eseguito mediante draga e sabbiodotto*

La draga spira acqua e sabbia a circa 20-30 m di profondità, a 20-30 miglia dalla costa. A questa viene collegato il sabbiodotto opportunamente zavorrato, all'interno del quale va garantita una velocità minima di 2-2,5 m/s al fine di evitare riflussi di sabbia, motivo per cui si richiede una prevalenza elevata che cresce notevolmente con l'aumentare della distanza dalla riva.

Il lancio con bettolina rappresenta una tecnica particolarmente utile in siti a forte escursione di marea, dato che consente all'imbarcazione di arrivare molto vicina alla spiaggia. Il lancio della miscela di sabbia e acqua (tipicamente in proporzioni di 1:6) avviene fornendo una pressione di alcune atmosfere. In questo caso è inevitabile la perdita della parte di energia fornita all'acqua (15%), ma si evitano perdite di tempo e gli elevati costi derivanti dall'uso di sabbiodotti.



*Figura 2.4 – lancio con bettolina*

Una volta versata la sabbia, essa viene sistemata con i mezzi di terra.



*Figura 2.5– sistemazione del materiale apportato con mezzi di terra*

### ❖ **Il Ripascimento con Sabbie Dragate**

Sono sabbie non inquinate dragate in ambito portuale.

La rimozione della sabbia dai fondali marini può avvenire in due modi:

- per via *meccanica* tramite un container che raccoglie il materiale dal fondo;
- per via *idraulica* creando una sovrappressione o un vuoto all'interno della pompa di aspirazione, effettuando di conseguenza, il pompaggio di una miscela di acqua-sedimento.

Esistono due principale tipi di draghe:

- draghe “cutter” (*figura 2.6*): non hanno la capacità di trasportare il materiale e sono spesso collegate ad una tubazione galleggiante che raggiunge la spiaggia; altrimenti scaricano la sabbia su chiatte. La bocca aspirante rompe il materiale solido tramite un taglio rotante, facilitando la miscelazione con l'acqua e il passaggio attraverso il sistema di rilancio. Queste draghe possono pompare la miscela alla distanza di qualche km, possono lavorare solo in presenza di limitate altezze d'onda e in acque profonde più di 35m.
- Draghe trainanti TSHD (*figura 2.7*): queste draghe combinano le funzioni di dragaggio e trasporto. Per caricarsi passano più volte sopra l'area di prestito, trascinando il tubo aspirante sul fondale; la velocità della barca in questa fase è di 2/3 nodi. Hanno il vantaggio di non dipendere da nessun altro tipo di imbarcazione e possono lavorare anche a profondità maggiori rispetto alle draghe cutter, con onde che raggiungono i 2 m di altezza. Non hanno restrizioni per la navigazione nelle aree di prestito non necessitando di tubazioni al seguito.

<b>Cutter suction dredger</b>		Construction year:	1969	Dredging depth:	max. 14.30 m	Power:	
Santa Gilla.		Dimensions: Length o.a.:	52.30 m		min. 3.00 m	- Total installed:	2,138 HP / 1,572 kW
		Breadth:	9.00 m	Delivery pipe :	600 mm	- Cutter drive:	300 HP / 221 kW
		Depth:	2.50 m			- Delivery pump:	1,700 HP / 1,250 kW
		Draught:	1.50 m				

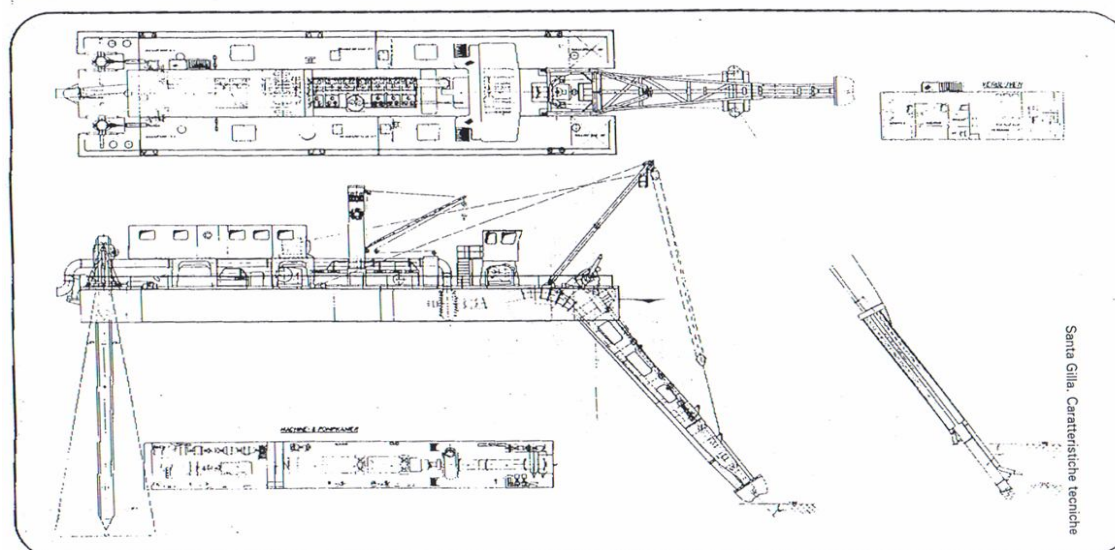
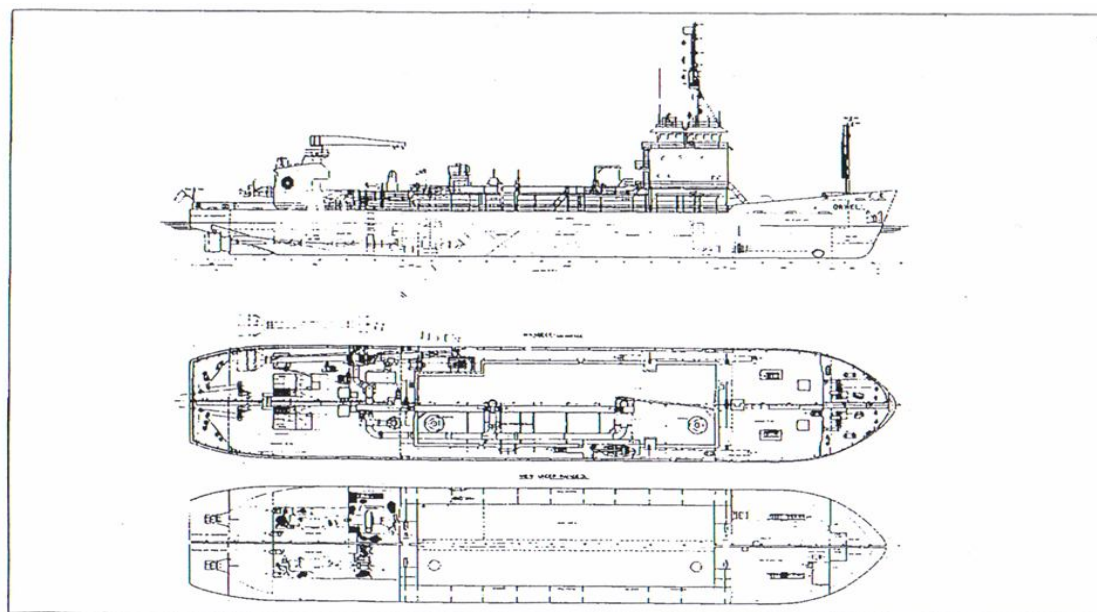


Figura 2.6 – draga “cutter”



#### Split Trailing Suction Hopper Dredger ORWELL

Construction year:	1987	Dredging depth:	max. 24 m	Power:	
Dimensions: Length o.a.:	89.55 m	Hopper capacity:	2575 m <sup>3</sup>	- Total installed:	3587 kW
Breadth o.a.:	15.70 m	Loading capacity:	3800 tons	- On pumps trailing:	725 kW
Moulded depth:	6.30 m	Suction pipe Ø:	800 mm	shore delivery	1680 kW
Draught max.:	5.15 m	Max. speed loaded:	11.50 knots	- Propeller drive	2000 kW

Figura 2.8 – draga TSHD

### ❖ **Il Ripascimento con Sabbie Relitte**

Le sabbie relitte sono depositi sedimentari non diagenizzati, situati lungo la piattaforma continentale in condizioni di non equilibrio con la dinamica sedimentaria attuale. La movimentazione di tali sedimenti, trovandosi al largo e ad elevate profondità, non influenza il regime del moto ondoso e quindi la dinamica costiera.

Tali depositi sono generalmente riferibili ad antiche spiagge (paleospiagge), la cui formazione viene fatta risalire al periodo di basso stazionamento del livello marino dell'ultimo glaciale o alla fase di risalita successiva che ha caratterizzato l'Olocene. Circa 22 mila anni fa, infatti, durante l'ultimo periodo glaciale, il mare ha stazionato a circa -120 m rispetto al livello attuale. Il riscaldamento globale successivo ha determinato lo scioglimento delle coltri glaciali, portando il mare ad una rapida risalita, sino ad un livello prossimo all'attuale raggiunto circa 6 mila anni fa. Lungo la piattaforma continentale, si sono così potuti succedere, sino all'attuale conformazione, ambienti litorali diversi. I depositi di sabbie relitte presenti lungo le piattaforme continentali possono essere coperti da sedimenti pelitici di deposizione recente o essere affioranti.

Nonostante i depositi di sabbie relitte siano presenti lungo la piattaforma continentale a profondità variabili tra i 30 e 130 m, la fascia ottimale per il loro sfruttamento ai fini di ripascimento è attualmente quella compresa tra i 50 e 100 m di profondità. In alcuni casi, l'impiego di sabbie relitte è, tuttavia, difficilmente realizzabile, soprattutto per ragioni di tipo economico. Queste difficoltà sono legate alla presenza di condizioni particolari, come una copertura pelitica di spessore rilevante, un limitato spessore di depositi sabbiosi e di conseguenza limitate cubature di sabbia, significativi contenuti di sedimenti fini (diametro <63 micron), depositi localizzati a profondità troppo elevate.

Attualmente affinché un deposito di sabbie relitte abbia un reale interesse minerario, devono essere soddisfatte, contemporaneamente, le seguenti condizioni:

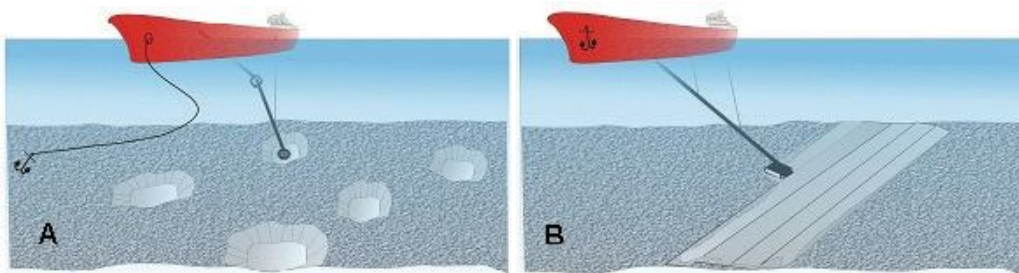
- il deposito deve essere costituito da sabbie con caratteristiche granulometriche idonee;
- il deposito deve avere spessori consistenti, superiori ai 3-4 m;
- il deposito deve essere affiorante o avere una limitata copertura pelitica, inferiore ai 3-4 m;
- il deposito deve essere localizzato in aree con profondità non superiore ai 100 m;
- il deposito deve avere una cubatura significativa, generalmente superiore ai 3.000.000 mc;



- il deposito non deve presentare alla superficie formazioni incrostanti.

In ambito europeo vengono utilizzati principalmente due tipi di draga:

- le draghe stazionarie (anchor dredging): effettua il prelievo del sedimento ancorandosi in singole stazioni, nelle quali la testa dragante, situata all'estremità della tubazione (elinda), viene infissa verticalmente nel fondo, permettendo l'aspirazione del sedimento da dragare. Tale metodo è da preferirsi laddove il deposito da coltivare presenti un prevalente sviluppo verticale e/o spazialmente limitato. Con l'uso di questo tipo di draga, si creano una serie di depressioni e/o pozzi di forma sub circolare, di dimensioni variabili, in funzione del tipo di draga: da 2 a oltre 20 m per la profondità e da 20 a 100 m per il diametro.
- Le draghe semoventi (trailer dredging): il sedimento viene prelevato attraverso una o più tubazioni, mentre la draga si sposta lentamente lungo le rotte definite in funzione del piano di coltivazione. Con l'uso di questo tipo di draga, si creano una serie di solchi, sub paralleli tra loro, di dimensioni variabili in funzione del tipo di draga: da 1-2 m fino a 4-5 m di larghezza e profondi 0,5-2 m.



*Figura 2.9 - A) Draga stazionaria; B) Draga semovente*



*Figura 2.10 - Draga stazionaria con l'elinda in superficie; all'estremità dell'elinda è ben visibile la testa dragante*

## 2.2.4 Aspetti Ambientali del Dragaggio di Sabbie a Fini di Ripascimento

L'attività di dragaggio di sabbie relitte ai fini di ripascimento e il ripascimento stesso, comporta una serie di effetti sull'ambiente marino nelle diverse aree interessate:

- l'area della piattaforma continentale in cui è presente il deposito di sabbie relitte che si intende coltivare, denominata **area di dragaggio**;
- l'area che si estende dal sito di dragaggio a quello di ripascimento, denominata **area di trasporto**;
- l'area che interessa la spiaggia oggetto del ripascimento vero e proprio, denominate **area di ripascimento**.



*Figura 2.11 - Aree coinvolte nelle attività di dragaggio di sabbie relitte e di ripascimento*

Lo studio delle diverse problematiche ambientali dovrà tener conto delle diverse aree coinvolte. Durante le attività di dragaggio e ripascimento, le principali turbative riguardano:

- le alterazioni morfologiche e batimetriche del fondo e della linea di costa;
- le caratteristiche tessiturali e geotecniche dei sedimenti superficiali;
- l'immissione in sospensione di sedimento fine;



- l'immissione di sedimento fine sugli organismi bentonici per effetto della defaunazione e del seppellimento;
- gli effetti di turbativa sull'ambiente, che possono avere ricadute significative su attività economiche quali ad esempio la pesca.

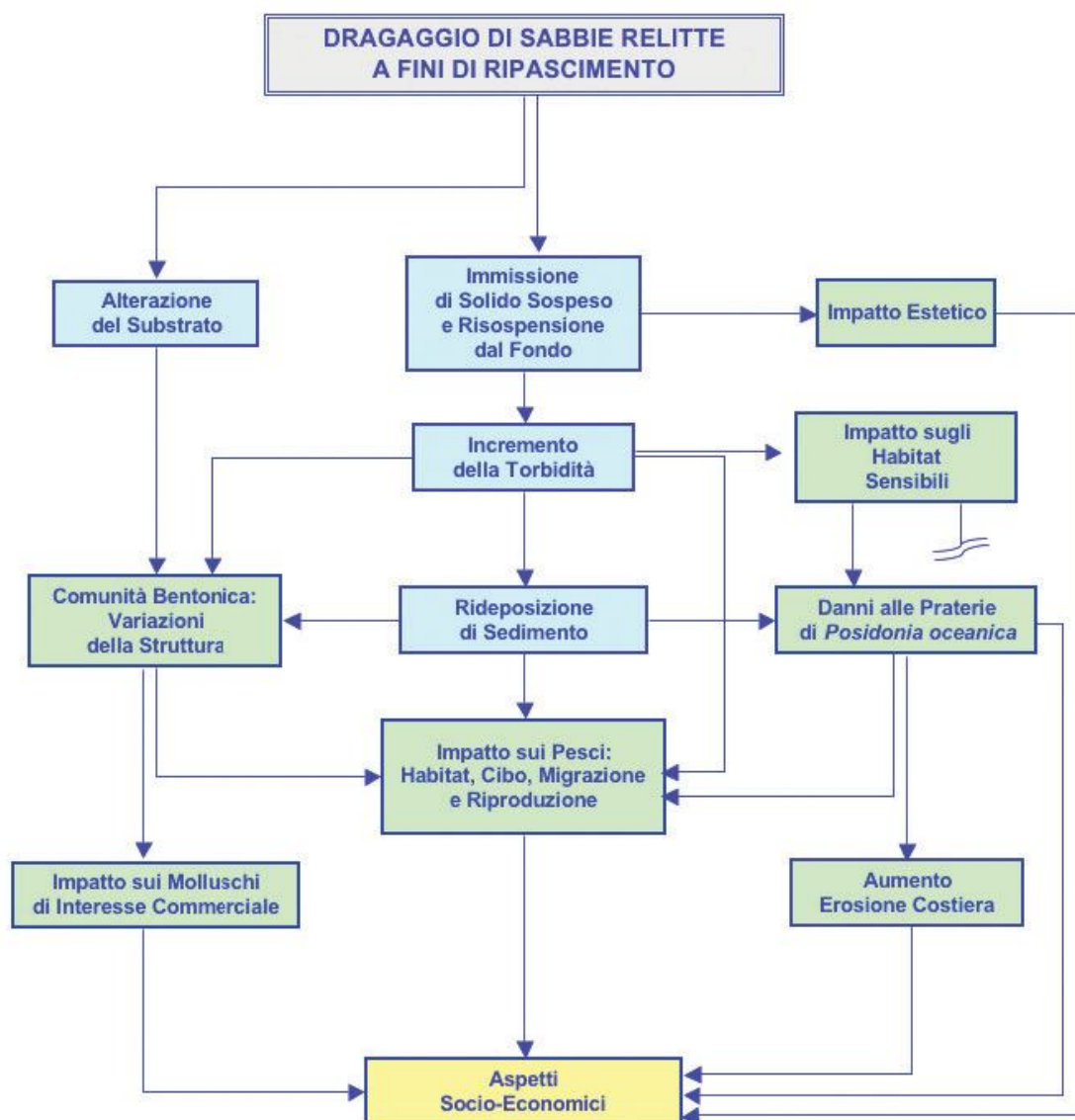


Figura 2.12 - Dragaggio a fini di ripascimento: turbative ambientali e ricadute economiche

### ❖ Area di Dragaggio

Durante le attività di dragaggio si possono verificare alterazioni non trascurabili sia sul comparto fisico sia su quello biologico.

Relativamente al comparto fisico si individuano due ambiti principali:

- *substrato*: morfologia e batimetria (già discusso al precedente paragrafo). Per quanto riguarda l'aspetto chimico dei sedimenti è noto che la loro movimentazione può comportare, qualora fossero presenti, la rimobilitazione di specie chimiche, con possibili ripercussioni sul sistema marino. Le sabbie relitte in genere non presentano anomalie di concentrazioni, ma nonostante questo, prima di procedere al dragaggio è bene verificarne le condizioni di naturalità.
- *Colonna d'acqua*: incluse anche le caratteristiche chimico-fisiche e le concentrazioni di particelle in sospeso. Durante il dragaggio può verificarsi a diverse profondità, il rilascio di sedimenti lungo la colonna d'acqua con la formazione di un pennacchio di torbida (*turbidity plume*) e la conseguente alterazione delle caratteristiche idrologiche naturali. La *plume*, è un fenomeno temporaneo dovuto all'immissione nella colonna d'acqua di solido sospeso per effetto del dragaggio, che determina un aumento localizzato della torbidità. L'estensione e la durata della *plume* dipendono dalla natura e dal volume del sedimento mobilizzato, dalle caratteristiche della draga e dalle condizioni idrodinamiche locali. La *plume* può essere:
  - *superficiale*, generata in seguito allo scarico fuoribordo (*overflow*) di una miscela di acqua e sedimento fine, che si verifica principalmente durante la fase di carico della draga per effetto dello scarico dell'acqua in eccesso aspirata assieme al sedimento;
  - *di fondo*, la parte più densa del materiale scende velocemente verso il fondo, mentre i sedimenti fini, scendono più lentamente. Le dimensioni della *plume* di fondo sono da 4 a 5 ordini di grandezza inferiori a quelle della *plume* superficiale.

Gli effetti delle attività di dragaggio sugli organismi marini riguardano direttamente le comunità bentoniche. I più evidenti sono legati alla completa rimozione dei sedimenti superficiali e, di conseguenza, alla defaunazione diretta dell'area dragata. Inoltre si

possono avere ripercussioni anche sui popolamenti ittici con effetti negativi sulle attività di pesca e quindi un impatto economico negativo.

- *Organismi marini*: nell'ambiente si distinguono due grandi domini: il dominio bentonico rappresentato dai fondo marini e il dominio pelagico che è costituito dalle masse d'acqua sovrastanti. Il primo è popolato dagli organismi di fondo (benthos) e il secondo da quelli pelagici (plancton e necton).
  - *Benthos*: organismi che contraggono un rapporto con il substrato che può essere duro o mobile. Il principale effetto del dragaggio consiste nella parziale o completa rimozione delle comunità bentoniche presenti e nel disturbo indotto sulle aree limitrofe. Inoltre la quantità elevata di sedimento messo in sospensione può influire sui processi fotosintetici degli organismi, ma non è un fattore limitante per quelle comunità bentoniche ubicate a profondità elevate e quindi già prive di luce. In tabella sono riportati alcuni dati relativi ai tempi di recupero di alcune comunità bentoniche insediate in diversi habitat.



*Figura 2.13-Campionamento del benthos con l'utilizzo di una benna Van Veen*

- a. *Plankton*: organismi animali (*zooplankton*) e vegetali (*fitoplankton*) che sono incapaci di compiere movimenti autonomi sufficienti a contrastare onde e correnti e che vengono quindi trasportati passivamente per effetto delle stesse. Gli effetti del dragaggio sono principalmente connessi all'aumento del solido sospeso e quindi alla torbidità.
- b. *Necton*: organismi acquatici in grado di nuotare attivamente vincendo la forza delle correnti. E' formato prevalentemente da pesci, crostacei, molluschi, e da un numero relativamente piccolo di specie animali come rettili (tartarughe e serpenti), uccelli (pinguini) e mammiferi (cetacei e pinnipedi). Gli effetti del dragaggio sono rilevanti soprattutto per quelle specie legate al fondo, sia da un punto di vista trofico che riproduttivo, e quindi sensibili alle variazioni delle sue caratteristiche. Tali variazioni sono principalmente legate alla sospensione di sedimento nella colonna d'acqua e alla conseguente rideposizione di questo sul fondo. Per quanto riguarda i mammiferi e le altre specie in pericolo è quello di entrare in collisione con i mezzi nautici operanti al momento del dragaggio, cui si associano gli effetti del disturbo legato allo svolgimento delle attività (rumore).

Nelle aree potenzialmente di dragaggio, possono anche essere presenti grandi infrastrutture (strutture offshore, cavi, condotte, oleodotti), attività antropiche (maricoltura), nonché aree di particolare destinazione d'uso. Tutti elementi la cui localizzazione deve essere conosciuta e cartografata sin dalle prime fasi degli studi di compatibilità.

#### ❖ Area di Trasporto

Le alterazioni che si possono presentare sull'ambiente fisico durante le operazioni di trasporto riguardano essenzialmente la colonna d'acqua, per effetto della torbidità generata dall'overflow della draga e il substrato, per effetto della sedimentazione del materiale portato in carico dalla plume. Un aspetto da non sottovalutare è quello relativo alla durata prevista per le attività, in quanto qualora il trasporto interessi un arco di tempo considerevole, è possibile che crei delle ricadute sugli habitat sensibili eventualmente presenti.

### ❖ **Area di Ripascimento**

Possono comportare importanti modificazioni sia sulla morfodinamica del fondo sia sulla colonna d'acqua. Gli effetti sono principalmente associati al ricoprimento generato durante il rifluimento di sabbia e alla torbidità dell'acqua.

Una particolare attenzione va rivolta alla presenza di organismi bentonici come i molluschi qualora essi siano oggetto di attività di pesca.

L'attività di ripascimento ha inizio con il rifluimento della sabbia nella parte emersa della spiaggia. Da questa il sedimento viene ridistribuito dal moto ondoso verso largo fino alla massima profondità di azione del moto ondoso (profondità di chiusura della spiaggia attiva), per essere infine rideposto lungo il nuovo profilo di equilibrio. Il materiale mobilizzato lungo la zona costiera, può anche dar luogo alla formazione di elemento temporanei (barre) che scompaiono a seguito dell'azione naturale del moto ondoso.

Le alterazioni fisiche che interessano la spiaggia comprendono:

- cambiamenti della linea di riva che, modificata, può determinare variazioni significative sui fenomeni di rifrazione del moto ondoso e quindi sul trasporto sedimentario locale;
- variazione dei tassi di sedimentazione;
- variazione delle caratteristiche granulometriche e geotecniche dei sedimenti.

Le variazioni presenti a carico del sedimento e relative alle caratteristiche tessiturali, geotecniche e di composizione, possono avere una ripercussione sull'aspetto estetico della spiaggia (dimensione, colore) rispetto alle sabbie originali. Infatti, mentre la distribuzione granulometrica è un parametro essenziale ai fini del mantenimento del profilo di equilibrio della spiaggia, il tipo di sedimento e/o il colore, possono avere rilevanza soprattutto nel caso di spiagge di particolare valenza paesaggistica.

## **2.3 Il Ripascimento in Emilia-Romagna: il “Progettone”**

La difesa delle spiagge dal fenomeno dell'erosione marina in Emilia Romagna ha subito una modificazione sostanziale nei primi anni '80 a seguito dell'approvazione e della messa in pratica da parte della Regione delle indicazioni del Piano Costa 1981.

Questo aveva infatti posto l'esigenza di abbandonare la difesa rigida, generalmente realizzata con massi rocciosi assemblati in diverse tipologie di opere, per l'elevato impatto paesaggistico-ambientale e aveva indicato quale alternativa, il ripascimento artificiale. La differenza degli effetti prodotti dall'applicazione dei due diversi sistemi, difese rigide e ripascimenti, è tale: mentre la realizzazione di nuove scogliere determina lo spostamento continuo del punto di erosione sui litorali limitrofi, spostando semplicemente il problema, con il ripascimento il punto di erosione resta fermo, inoltre la sabbia che il mare asporta nelle zone di intervento va ad alimentare le spiagge sottoflutto.

Per far fronte ai processi erosivi, tra il 1983 e il 2006, sono stati portati a ripascimento 6.6 milioni di mc di sabbia. Per decenni, il materiale proveniente dal dragaggio dei numerosi porti presenti lungo la costa, era stato portato sui fondali tre miglia al largo. Si è in seguito preso atto che in buona parte si trattava di materiale di buona qualità, idonea al ripascimento, se non proprio della spiaggia emersa, almeno dei fondali antistanti. Oltre ai materiali provenienti dal dragaggio delle imboccature portuali, sono state utilizzate diverse altre fonti, tra cui in particolare:

- spiagge in avanzamento continuo;
- scanni di Goro e Volano;
- materiali vagliati provenienti dalla pulizia delle spiagge;
- materiali provenienti da scavi edili (Riccione);
- escavazione di nuove darsene;
- accumuli sottomarini.

In particolare, più di 2,5 milioni di mc di sabbia sono stati prelevati da cave a terra, circa 300.000 mc da aree litoranee dove si era venuto a creare un surplus di sabbia, circa 200.000 mc dal dragaggio delle imboccature dei porti canale ed altri 200.000mc dagli scavi per la realizzazione della nuova darsena di Rimini.

## ❖ Il “Progettone”

Nel giro di qualche anno, a partire dal 1996, è emerso in tutta evidenza, che le fonti di sabbia litoranee, erano del tutto insufficienti per soddisfare la domanda di gestione dell'intero litorale. Il ricorso alle cave a terra, da cui erano stati prelevati fino al 1999, più di 3,1 milioni di mc di sabbia, risultava una pratica sempre meno sostenibile sotto il profilo economico (15€/mc), ambientale e dell'ottimale utilizzo della risorsa (edilizio).

Ciò che avrebbe potuto soddisfare la domanda di materiale per alimentare artificialmente il litorale, sono gli accumuli sottomarini scoperti da Idroser nel 1984.

Nel 2000, il Servizio Regionale di Protezione Civile ha attuato anche in Emilia-Romagna, il ripascimento con sabbie sottomarine.

Questa tecnica, già largamente impiegata da diversi decenni in Olanda e dagli anni '80 in Spagna, è stata utilizzata per la prima volta in Italia nel 1995 dal Consorzio Venezia Nuova e nel 2000 dalla Regione Lazio, per la difesa dei litorali di Ostia. In considerazione dei positivi riscontri forniti da questi primi interventi, nel 2000 la Giunta Regionale ha così destinato 22 miliardi di lire alla realizzazione della proposta progettuale. Il gruppo tecnico di Idroser, passato in ARPA nel 1996, è stato incaricato dell'individuazione e caratterizzazione dell'area di prelievo, della progettazione e del monitoraggio dell'intervento. La sua denominazione: “Progettone” deriva dal titolo formale: “Programma degli interventi di messa in sicurezza dei tratti critici del litorale emiliano-romagnolo mediante ripascimento con sabbie sottomarine”.

Nel periodo compreso tra il 13 febbraio e il 5 maggio 2002, una draga a strascico autoricaricante-refluente, delle capacità di 6.000 mc, ha prelevato 800.000 mc di sabbia da un dosso sottomarino giacente ad una profondità di 40 m e a una distanza da terra di 55 km, distribuendola su 8 spiagge distinte, di lunghezza complessiva di 9 km.

Tre di esse sono coperte da scogliere parallele emerse, una da pennelli in roccia, due da barriere sommerse in sacchi, due sono prive di ogni tipo di difesa.

Il Progettone ha dimostrato che spiagge così diverse tra loro potevano essere allargate di decine di metri con impatto ambientale e disagi pressoché nulli. Inoltre, le molte specie che costituiscono il benthos sottomarino, hanno ricolonizzato l'area interamente nel giro di 24-30 mesi, e nessun danno si è avuto tra le specie ittiche.

I principali risultati sono:

- a tre anni dall'intervento, il 50% delle sabbie apportate era ancora presente, tra spiaggia e barre sommerse;



- la sabbia fuoriuscita ha garantito l'equilibrio di altri 16 km di spiagge sottoflutto rispetto a quelle oggetto di ripascimento.

A conferma dei risultati positivi ottenuti, nel 2007, la Regione ha stanziato il secondo intervento di ripascimento con sabbie sottomarine: "Progettone 2"

Il volume di sabbia apportato è di 815.000 mc, le spiagge interessate sono 7. In figura si riporta la planimetria dell'intervento e in tabella i quantitativi di sabbia apportati sulle 7 spiagge.

Per garantire i ripascimenti anche nei decenni futuri, manca la certezza dei volumi di sabbia presenti nei giacimenti sottomarini. Un contributo positivo è venuto nel progetto Beachmed-e, con il quale è stato scoperto un nuovo giacimento di sabbia molto fine, su fondali oltre 50 m al largo delle coste riminesi.

La scoperta delle fonti di sabbia sottomarine è senz'altro di particolare valore, soprattutto in relazione agli impatti ambientali negativi derivanti dall'utilizzo di altre fonti di approvvigionamento.

Ai fini della riduzione dell'impatto ambientale connesso con le diverse modalità di esecuzione degli interventi di ripascimento, si è visto che il prelievo di sabbia da cave a terra è l'operazione di gran lunga più impattante:

- apertura di nuove cave a terra;
- trasporto su strada di ingenti volumi di sabbia;
- attraversamento dei centri abitati da parte di camion;
- circolazione di un gran numero di mezzi sulle spiagge in oggetto;
- sottrazione di materiali pregiati per l'edilizia.

Diversamente, il ripascimento con sabbie sottomarine:

- approfondimento del fondale di 1-2 m nell'area di prelievo posta a decine di km dalla costa;
- temporanea scomparsa del macrozoobenthos e ritorno alle condizioni iniziali in 24-30 mesi;
- presenza di mezzi meccanici in movimento sulle spiagge per sole 1-2 settimane;
- costi molto minori.

Per queste ragioni, la Regione è andata riducendo il prelievo di materiale sabbioso da cave a terra e a favorire, in primo luogo, il ricorso alle fonti litoranee, ben adatte ad interventi di manutenzione o di modeste entità. Il ricorso alle sabbie sottomarine risulta invece competitivo sotto il profilo economico solo se i volumi da movimentare sono superiori a 600-700 mc (8/10 milioni di euro).

Nelle tabelle e nelle figure successive, sono mostrati:-

- l'incremento dei quantitativi di materiale portato a ripascimento;
- la riduzione in 7-8 anni del prelievo di materiale da ave a terra: dall'85% al 16%.

Comune	Cave a terra	Scavi edili e darsene	Accumuli litoranei	Accumuli sottomarini	Totale
Misano	235.000	0	50.000	0	285.000
Riccione	271.150	20.000	215.850	0	507.000
Rimini Nord	0	0	0	0	0
Igea Marina - Bellaria	0	0	0	0	0
San Mauro - Savignano	2.000	0	0	0	2.000
Gatteo	0	0	0	0	0
Cesenatico Sud	0	0	4.000	0	4.000
Cesenatico Nord	254.000	0	32.500	0	286.500
Cervia-Milano Marittima	583.000	0	0	0	583.000
Ravenna Sud	1.000.000	0	0	0	1.000.000
Ravenna Nord	365.000	0	0	0	365.000
Comacchio Sud	0	0	92.000	0	92.000
Comacchio Nord	0	0	41.000	0	41.000
Goro	0	0	0	0	0
<b>Totale</b>	<b>2.710.150</b>	<b>20.000</b>	<b>435.350</b>	<b>0</b>	<b>3.165.500</b>

Tabella 10-2 Fonti di prelievo del materiale sabbioso portato a ripascimento e nel periodo 1983-1999 (m<sup>3</sup>)

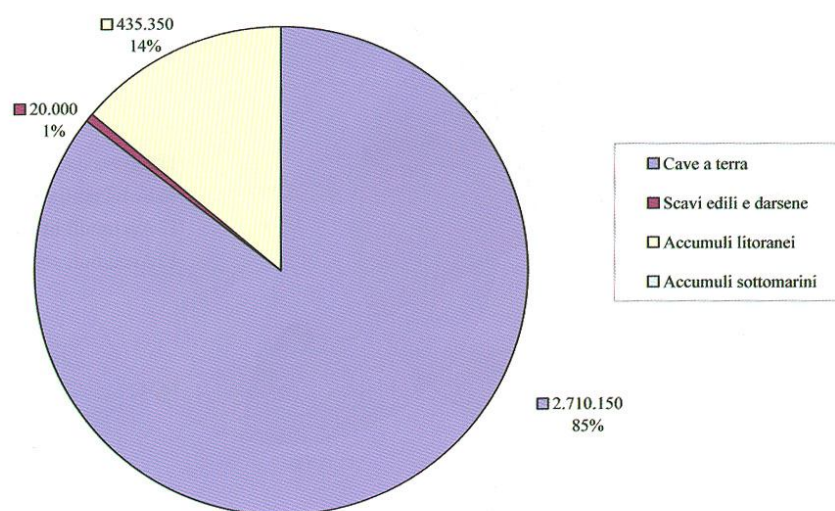


Figura 2.14-Ripartizione percentuale delle fonti di prelievo del materiale sabbioso portato a ripascimento nel periodo 1983-1999 (mc).

Comune	Cave a terra	Scavi edili e darsene	Accumuli litoranei	Accumuli sottomarini	Totale
Misano	21.250	51.800	203.830	314.300	591.180
Riccione	0	201.500	162.330	358.815	722.645
Rimini Nord	0	100.000	0	0	100.000
Igea Marina - Bellaria	0	19.700	23.900	170.988	214.588
San Mauro - Savignano	6.917	5.050	3.333	27.000	42.300
Gatteo	800	2.700	0	18.000	21.500
Cesenatico Sud	203.320	18.637	37.483	20.000	279.440
Cesenatico Nord	39.683	204.890	33.817	111.891	390.281
Cervia-Milano Marittima	90.945	0	131.400	266.208	488.553
Ravenna Sud	371.175	0	0	337.997	709.172
Ravenna Nord	41.150	250.000	178.255	0	469.405
Comacchio Sud	0	0	343.100	0	343.100
Comacchio Nord	0	0	492.200	0	492.200
Goro	0	0	99.000	0	99.000
<b>Totale</b>	<b>775.240</b>	<b>854.277</b>	<b>1.708.648</b>	<b>1.625.199</b>	<b>4.963.364</b>

Tabella 10-3 Fonti di prelievo del materiale sabbioso portato a ripascimento nel periodo 2000-2007 (m<sup>3</sup>)

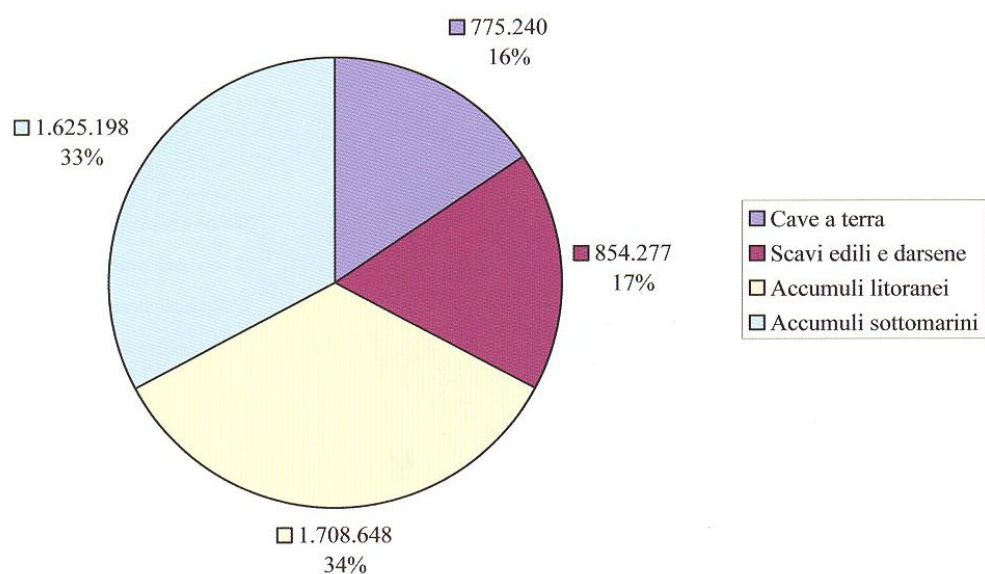


Figura 2.15-Ripartizione percentuale delle fonti di prelievo del materiale sabbioso portato a ripascimento nel periodo 2000-2007 (mc).

### **2.3.1 Il Problema della Fonte di Sabbia**

La fascia costiera dell'Emilia-Romagna è un territorio alluvionale attraversato da numerosi fiumi di origine appenninica che qui sfociano ad intervalli di 10-15 km.

La chiusura sul lato nord di questo territorio è costituita dal fiume Po che si spinge in mare per 23 km.

Fino alla metà del secolo scorso, quando le precipitazioni erano molto abbondanti e il trasporto di sedimenti al mare da parte dei fiumi molto elevato, la sabbia era un materiale molto comune e quindi di scarso valore.

Con il boom economico degli anni '60, i depositi di sabbia e ghiaia sono stati quasi del tutto esauriti dalle escavazioni a scopo edili, il che ha costretto le Autorità pubbliche a bloccare, negli anni '80 le escavazioni in alveo e, di conseguenza le imprese di estrazione a ricercare fonti di prelievo alternative a terra.

Lungo la fascia costiera ciò ha comportato l'apertura di nuove cave, soprattutto nel territorio del comune di Ravenna dove da molto tempo è attivo lo sfruttamento degli accumuli di sabbia presenti.

Nel momento in cui sono state chiuse le cave in alveo si è avuta una forte richiesta di sabbia da settori diversi, tra cui il ripascimento di spiagge.

Ciò ha prodotto inevitabilmente una forte lievitazione dei prezzi, tanto che agli inizi degli anni 2000 il materiale sabbioso proveniente da cave a terra e utilizzato per il ripascimento ha raggiunto e superato i 20 €/mc. La sabbia non poteva più essere considerata un materiale povero. Con il passare degli anni si è affermata l'idea del controsenso nell'utilizzare per il ripascimento materiale accumulato a terra e idoneo per scopi edili. Senza considerare l'impatto ambientale determinato dal trasporto della sabbia su strada dalle cave alle spiagge.

Per questo è stata avviata una ricerca di altre fonti tra cui la presenza di accumuli di sabbia in mare da utilizzare in alternativa alle cave a terra.

Complessivamente tra il 1983 e il 2000 sono stati indagati più di 1000 kmq di fondali marini davanti e al largo della costa emiliano-romagnola mediante l'esecuzione di oltre 1000 km di profili sismici e 115 vibrocarotaggi.

Si sono così individuati 6 dossi sabbiosi situati tra i 34 e i 40 m di profondità e distanti 35-60 km dalla costa.



Il granulo medio delle sabbie presenti varia tra i 0,16 e i 0,20 mm, del tutto compatibile con le spiagge. Se le sabbie sottomarine possono rappresentare una valida alternativa alle sabbie prelevate dalle cave ai fini di ripascimento, ci chiediamo se non esista un'altra possibile fonte di approvvigionamento che possa risultare compatibile con le nostre esigenze.

Nella seguente tesi e nei prossimi capitoli, si vuole affrontare il problema della fonte di sabbia ai fini di ripascimento sotto un nuovo punto di vista.

Ciò che si vuole valutare è il possibile approvvigionamento di sabbia proveniente dal fiume Po, in prossimità dello sbarramento di Isola Serafini (*figura 2.16*).



*Figura 2.16-Sbarramento di Isola Serafini*

## **CAPITOLO TERZO**

*La sabbia del Fiume Po: studio di fattibilità del  
ripascimento della spiaggia di Misano Adriatico*

### 3.1 Introduzione

Fin'ora è stato affrontato il problema del ripascimento sia dal punto di vista della sua necessità, che dal punto di vista delle sue modalità operative.

Ciò che si vuole evidenziare in questa sede, è però relativo ad un aspetto più legato alle risorse. Se infatti fino ad oggi i materiali necessari allo scopo, sono stati prelevati da cave, sia terrestri che sottomarine, si ricerca ora una fonte alternativa: la sabbia del fiume Po.

Come si sa, la presenza di traverse fluviali, ostacola il trasporto solido verso valle andando a creare un manchevole apporto di sedimenti sulla zona costiera. Il materiale accumulato lungo l'asta del fiume ed in modo particolare in prossimità degli sbarramenti, viene ad oggi prelevato per scopi edili. Ciò però non impedisce di valutare la possibilità di prelevare tale materiale, qualora considerato di idonee qualità e compatibilità, ai fini di ripascimento.

In questa sede si focalizza l'attenzione sulla possibilità di prelevare sabbia a monte dello sbarramento di Isola Serafini per il ripascimento di spiagge del litorale Emiliano-Romagnolo.

Tale studio di fattibilità ha come principali obiettivi:

- la valutazione della granulometria della sabbia del Po e un suo possibile riutilizzo;
- l'efficienza del ripascimento con la sabbia del Po confrontata con gli attuali interventi di ripascimento;
- le modalità e i costi del trasporto di sabbia sia su gomma che a mezzo fluviale.

In particolare si focalizza l'attenzione su una spiaggia: Misano Adriatico.

La ricerca di nuove fonti di approvvigionamento, è dettata dalla sempre crescente richiesta di materiale per gli interventi di ripascimento che si stanno affermando come valida soluzione al problema dell'erosione costiera. Si fornirebbe in tal senso un nuovo approccio basato su un possibile "riutilizzo" di materiale che andrebbe comunque allontanato dalla sua sede e che potrebbe al contrario fornire una concreta soluzione al problema delle fonti di approvvigionamento.



### 3.2 Idraulica del Po, scenari di trasporto solido allo stato attuale e in presenza di sbarramenti

Dall'inizio degli anni '70 è presente su Po una traversa, con annesse conca di navigazione e centrale idroelettrica.

Si trova a Isola Serafini, 15 km a valle di Piacenza, e induce un salto medio di 11 m. Può turbinare una portata massima di 1000 mc/s e produce mediamente 470 GWh/anno. Per massimizzare la produzione, il gestore dell'impianto (Enel) apre completamente le paratoie solo quando la portata del Po supera i 3500-4000 mc/s; ciò accade mediamente per 8 giorni all'anno. Tale regola di gestione determina il passaggio a valle, di ridotti quantitativi di sabbia, stimabili nell'ordine di 0,2-0,3 Mmc/anno.

Come già visto il trasporto solido lungo i corsi d'acqua si verifica con due modalità diverse:

- in *sospensione*, connessa alla presenza di particelle fini;
- di *fondo*, connessa alla presenza di materiale grossolano.

L'entità del trasporto di fondo è legata essenzialmente alla velocità della corrente e al diametro del materiale presente. Se una quantità sufficiente di materiale non arriva da monte e dagli affluenti, la corrente tende a mobilitare il materiale di fondo erodendo l'alveo, quindi approfondendo progressivamente il suo letto.

In presenza di sbarramenti e in condizioni di invaso, essendo la sezione bagnata maggiore di quella che si verifica in condizioni indisturbate, le velocità idriche si ridurrebbero in soluzione inversamente proporzionale all'aumentare della sezione. Se quindi la velocità media della corrente nelle condizioni attuali è 0,8 m/s (1,5 m/s in piena), con gli sbarramenti chiusi si ridurrebbe a circa la metà, con valori che nei tratti subito a monte degli sbarramenti, arriverebbero a circa 0,3 m/s. Si tratta di valori per i quali le particelle di sabbia medio grosse iniziano a depositarsi. La riduzione del trasporto di fondo, porta alla formazione di accumuli di materiale a monte dello sbarramento e in seguito alla necessità di dragaggi. Per non parlare della riduzione del trasporto a valle che implicherebbe un'amplificazione dei fenomeni erosivi sulle coste Adriatiche.

Sul tratto da Isola Serafini a foce Mincio-Secchia il materiale di fondo, delle barre e delle golene, è costituito essenzialmente da ottime sabbie, di diametro medio 0,4-0,6

mm. Sono le cosiddette “Sabbie del Po” attualmente molto richieste dai settori delle costruzioni e delle grandi infrastrutture e al momento anche per i ripascimenti della spiaggia in provincia di Massa-Carrara.

Le estrazioni autorizzate, che secondo alcuni studi hanno raggiunto, attorno agli anni '80, anche i 10-12 Mmc/anno, allo stato attuale sono dell'ordine dei 3 Mmc/anno e riguardano cave su ambiti non demaniali entro le golene o all'esterno, in vicinanza degli argini, e comunque esterna alla zona del'alveo inciso.

Le attività estrattive sono regolate dalla “direttiva in materia di attività estrattive nelle aree fluviali del bacino del Po” approvata con D.P.C.M. del 24 Luglio 1998 come allegato 4 al “Piano Stralcio delle Fasce Fluviali” (PSSF). Essa riguarda le attività estrattive ed in particolare le attività di asportazione di materiali inerti dai corsi d'acqua, dal demanio fluviale, lacuale e marittimo, in merito ai quali definiscono criteri, indirizzi e prescrizioni tecniche per gli interventi di manutenzione, di sistemazione idraulica, di rinaturazione degli ambiti fluviali, nonché interventi di monitoraggio e controllo.

Le norme generali prevedono che nel bacino del Po, l'asportazione di materiali inerti dai corsi d'acqua, dal demanio fluviale, lacuale e marittimo è consentita nei seguenti casi:

- a. asportazioni costituenti a tutti gli effetti attività finalizzata alla conservazione della sezione utile di deflusso e al mantenimento della officiosità delle opere e delle infrastrutture;
- b. asportazioni costituenti parte integrante di interventi finalizzati al mantenimento della officiosità dei mandracchi di accesso ai porti fluviali e relativi imbocchi;
- c. asportazioni di materiali inerti dai bacini lacuali regolati da opere di sbarramento idraulico, per il mantenimento dell'officiosità dei canali di scarico e del volume utile di ritenzione previsto dal progetto dell'opera;
- d. asportazione di materiali litoidi costituenti parte integrante di interventi di difesa e sistemazione idraulica;
- e. asportazioni di materiali litoidi costituenti parte integrante di interventi di rinaturazione degli ambiti fluviali;
- f. asportazione manuale di ciottoli senza taglio di vegetazione, per quantitativi non superiori ai 150 mc annui.

### **3.2.1 Analisi granulometrica dei sedimenti del fiume Po**

Prima di affrontare il problema del ripascimento della spiaggia di Misano Adriatico, è opportuno valutare la granulometria della sabbia presente nel tratto di fiume Po interessato al fine di determinarne le caratteristiche di qualità e compatibilità con la sabbia esistente nel sito da ripascere.

E' noto infatti che un intervento di ripascimento per essere considerato ben riuscito sotto ogni aspetto, deve risultare sicuramente corretto dal punto di vista idraulico, ma deve anche soddisfare le richieste dei gestori delle spiagge, nonché dei bagnanti.

Una sabbia scura, o una sabbia di granulometria troppo elevata, possono avere un impatto visivo assolutamente negativo per chi al contrario è abituato ad avere sabbie chiare e sottili. Per questo, è opportuno valutare due principali caratteristiche della sabbia in esame:

- la granulometria, che non sia eccessivamente elevata (il diametro della sabbia di Misano è compreso tra 0,2 e 0,3 mm);
- la litologia, dalla quale è possibile valutare soprattutto i caratteri che ne definiscono colore e forma.

A tal proposito, si descrivono la metodologia utilizzata e le attività effettuate per determinare le caratteristiche granulometriche e litologiche dei sedimenti presenti nell'alveo inciso del fiume Po e, in particolare, nelle forme di fondo, nell'alveo sommerso e nelle sponde.

I dati seguenti sono stati estrapolati dall'analisi del corso fluviale che si estende per circa 490 km, a partire dalla confluenza con il Torrente Stura di Lanzo fino all'incile del delta (Po di Goro). Dal punto di vista geomorfologico e sedimentologico il fiume Po è caratterizzato da condizioni molto diversificate lungo il suo percorso, dipendenti sia dalle diverse condizioni geologiche riscontrabili da monte verso valle, sia dal relativo regime idraulico. Le condizioni geomorfologiche e i diversi regimi idraulici del Po, sono responsabili della diversificazione litologica e granulometrica, da monte verso valle, dei sedimenti costituenti le forme di fondo (barre e isole fluviali), l'alveo e le sponde.

Infatti si possono distinguere diversi tratti del corso d'acqua:

- il tratto iniziale, prevalentemente fluvio-torrentizio, con presenza di ghiaie e sabbie ghiaiose, molto grossolane, scarsamente classate e con alveo spesso inciso direttamente nel substrato lapideo (*figura 3.1*);



*Foto 3.1 – Tratto di sponda destra (sullo sfondo) impostata al piede del margine collinare del Monferrato. In primo piano si osservano depositi di barra ghiaioso-sabbiosi, molto grossolani.*

- a valle di confluenza del Sesia, si rileva la presenza di ghiaie e ghiaie sabbiose meno grossolane, con maggior grado di selezione, passanti progressivamente, verso valle, a sabbie ghiaiose e sabbie ben selezionate (*figura 3.2*);



*Foto 3.2 – Deposito di barra nel sistema braided, a valle di confluenza Sesia.*

- verso l'incile del delta, si rileva la presenza di sabbie e depositi limosi (figura 3.3).



*Foto 3.3 – Depositi sabbiosi ben selezionati (ansa meandrica di Isola Serafini, tra Piacenza e Cremona).*

Nel dettaglio, dal punto di vista geomorfologico, l'intero tratto fluviale in esame può essere suddiviso in sei macro-tratti principali, contraddistinti da un diverso assetto geomorfologico, litostratigrafico e sedimentologico:

- 1- macro-tratto compreso tra confluenza Stura di Lanzo e confluenza Sesia;
- 2- macro-tratto compreso tra confluenza Sesia e confluenza Ticino;
- 3- macro-tratto compreso tra confluenza Ticino e confluenza Trebbia;
- 4- macro-tratto compreso tra confluenza Trebbia e confluenza Secchia;
- 5- macro-tratto compreso tra confluenza Secchia e Pontelagoscuro;
- 6- macro-tratto compreso tra Pontelagoscuro e diramazione Po di Goro.

Il tratto interessato è il macro-tratto 4 compreso tra la confluenza del Trebbia e la confluenza del Secchia.

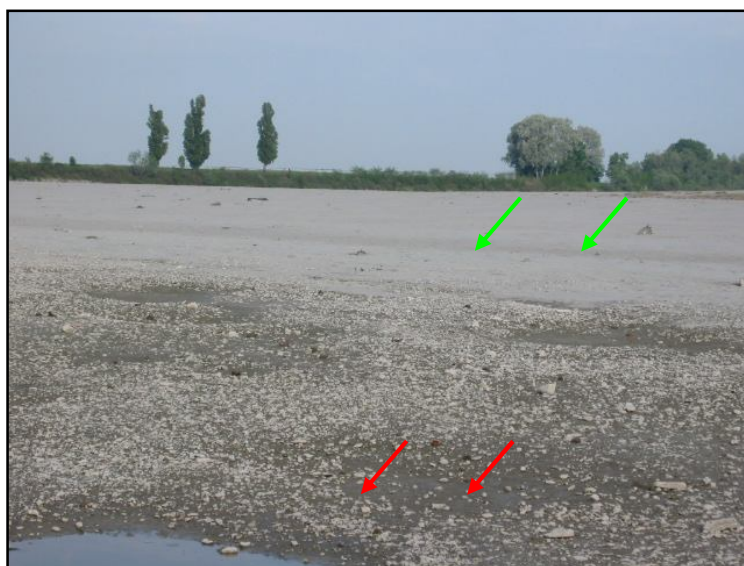
E' caratterizzato da un alveo inciso prevalentemente monocursale (a unico corso) e relativamente canalizzato, da sinuoso a localmente meandriforme. La configurazione geomorfologica dell'alveo inciso appare fortemente condizionata dall'effetto degli interventi antropici rappresentati dalle opere di navigazione e dallo sbarramento idroelettrico di Isola Serafini (a monte di Cremona).

Le forme di fondo (barre) sono costituite prevalentemente da sabbie; le sponde sono impostate in depositi sabbiosi molto fini, limosi o in limi sabbiosi. La gola è relativamente ampia.

In dettaglio:

- la parte iniziale del macro-tratto, fino a confluenza Enza, presenta sponde incise in un materasso di depositi prevalentemente sabbiosi;
- l'alveo di magra appare impostato in depositi sabbiosi-ghiaiosi; in superficie, sull'interfaccia con la corrente idrica, si riscontra in generale, una maggiore concentrazione ghiaiosa a causa del fenomeno di "corazzamento", dovuto al dilavamento più o meno spinto della frazione sabbiosa;
- a valle di Isola Serafini, la presenza di suddette ghiaie è riscontrabile solo nel segmento fluviale compreso tra confluenza Taro e Enza.

Il fatto che le ghiaie si trovino solo nell'alveo di magra e non nelle forme di fondo appare dovuto al fatto che nell'alveo inciso si concentra il "filone" principale della corrente dotato di velocità ed energia più elevate. Le sabbie invece, oltre che essere trasportate per trascinamento, possono subire un trasporto anche in sospensione e rappresentano pertanto i depositi della fase decrescente e della "coda" dell'evento di piena. Nella foto seguente (*figura 3.4*), si osserva la presenza di sabbie costituenti la barra (frecche verdi) e la presenza di sabbie ghiaiose, corazzate, in corrispondenza dell'unghia della barra e del fondo dell'alveo (frecche rosse).



*Foto 1.4 – Sabbie ghiaiose corazzate nell'alveo di magra (in primo piano) e depositi sabbiosi di barra (sfondo), sovrapposti alle sabbie ghiaiose.*

La sola eccezione alla condizione sopra esposta, in cui non sono state riscontrate le “ghiaie” in alveo, è rappresentata dal segmento fluviale situato immediatamente a valle del canale di restituzione dello sbarramento di Isola Serafini ed estendentesi circa fino a Cremona.

Importante è sottolineare che questo macro-tratto comprende anche il tratto navigabile.

I risultati delle analisi geomorfologiche eseguite tra la confluenza Stura di Lanzo e la diramazione Po di Goro, hanno consentito di suddividere il segmento fluviale in 9 “tratti omogenei”, contraddistinti da condizioni litologiche, geomorfologiche e sedimentologiche complessivamente omogenee. I tratti omogenei sono classificati dal “tratto omogeneo A” al “tratto omogeneo I”. In totale sono stati prelevati 291 campioni (sabbie, sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose) tutti sottoposti ad analisi granulometriche, per setacciamento, analisi litologiche e mineralogiche. E’ stata adottata una procedura che consentisse di prelevare campioni più rappresentativi possibile. Nella fattispecie, sono stati prelevati quantitativi di ghiaia del peso pari a 16 kg circa e di sabbia pari a circa 1,7 kg. Tutti i campioni sono stati preparati mediante il metodo della “quartatura” al fine di rendere la frazione analizzata rappresentativa dell’intero volume campionato. Il materiale prelevato è stato poi progressivamente omogeneizzato e dimezzato fino a raggiungere un volume pari a 1/5-1/10 di quello iniziale.

In questa sede ci si occupa di campioni prevalentemente sabbiosi. Il metodo di campionatura prevede la stasa, su un’area morfologicamente omogenea, di una “cornice” a sezione quadrata di 15 cm di lato. Il prelievo è stato eseguito asportando lo strato “superficiale” di sedimento, avente spessore pari a 5 cm, corrispondente ad un totale di circa 1,7 kg di materiale.

Sono state eseguite analisi di laboratorio, finalizzate all’acquisizione di:

- composizione granulometrica dei campioni e fuso rappresentativo di ogni tratto fluviale, nelle sue diverse componenti: alveo, sponde, barre;
- mineralogia e litologia della componente sabbiosa;

attraverso specifiche analisi granulometriche (per setacciamento) e litologiche (petrografiche e mineralogiche).



**Analisi Granulometriche:** eseguite per setacciamento, mediante l'uso di setacci in acciaio "Endecotts", aventi diametro pari a 200 mm. I limiti inferiori e superiori dei setacci sono stati stabiliti in corrispondenza dei diametri: 0,062 mm (limite inferiore delle sabbie); 25 mm (ciottoli medi).

**Analisi Litologiche:** per le sabbie è stata eseguita la determinazione petrografica dei frammenti litici e la composizione mineralogica dei granuli monominerali mediante microscopio ottico in luce riflessa. La metodologia di analisi prevede l'uso della frazione di dimensione comprese tra 0,25 e 0,50 mm.

La determinazione della forma e del grado di arrotondamento è stata eseguita per ciascun costituente fondamentale, riportando, nella tabella 1 riassuntiva, solo le indicazioni delle caratteristiche più frequenti e abbondanti.

#### FORMA DEI GRANULI

- Discoidale
- Sferica
- Lamellare
- Allungata

Qz	Feld	Pl	Mi	Amph	Px	Ol	Calc
			X				
X	X	X			X		X
					X		

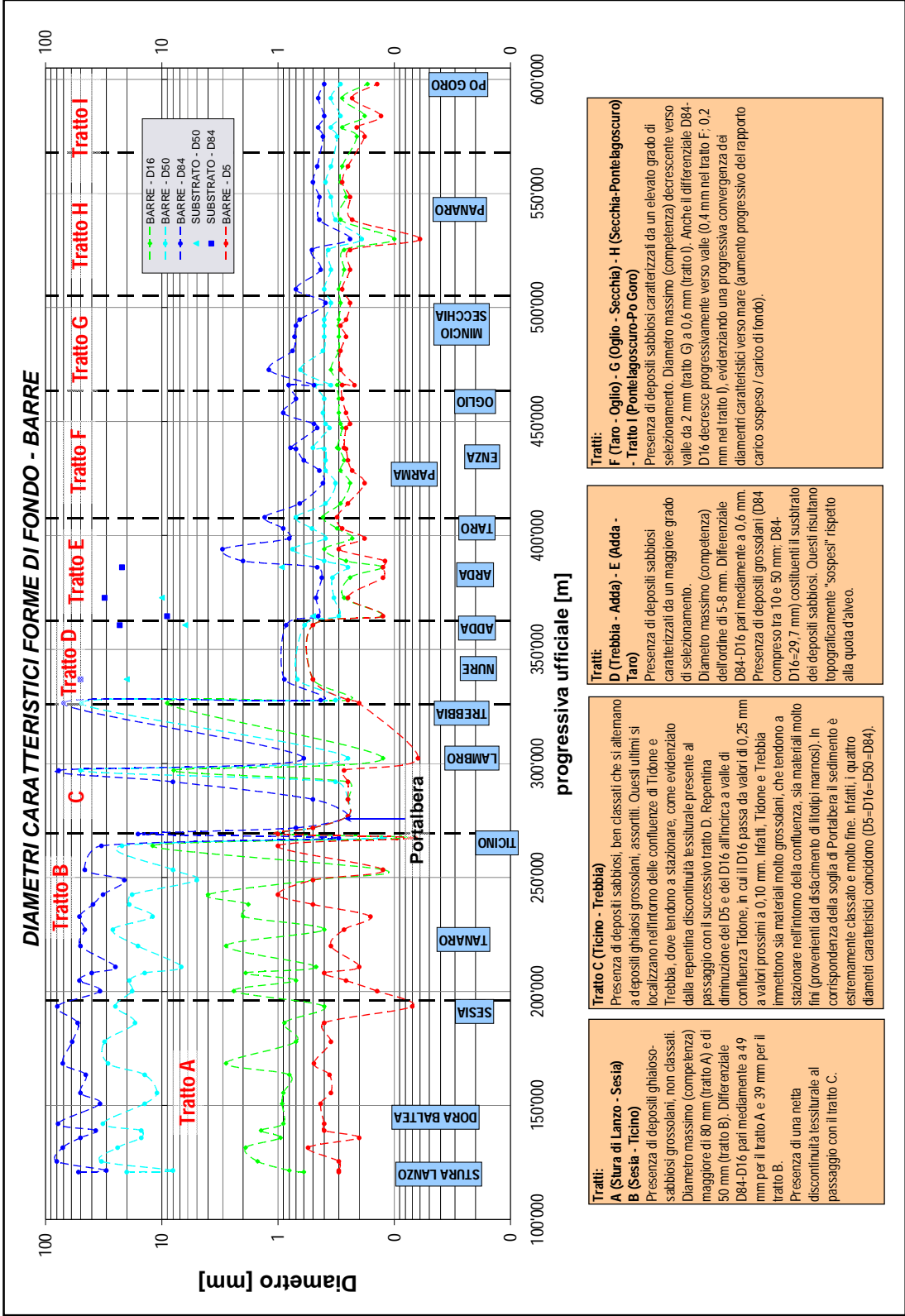
#### GRADO DI ARROTONDAMENTO

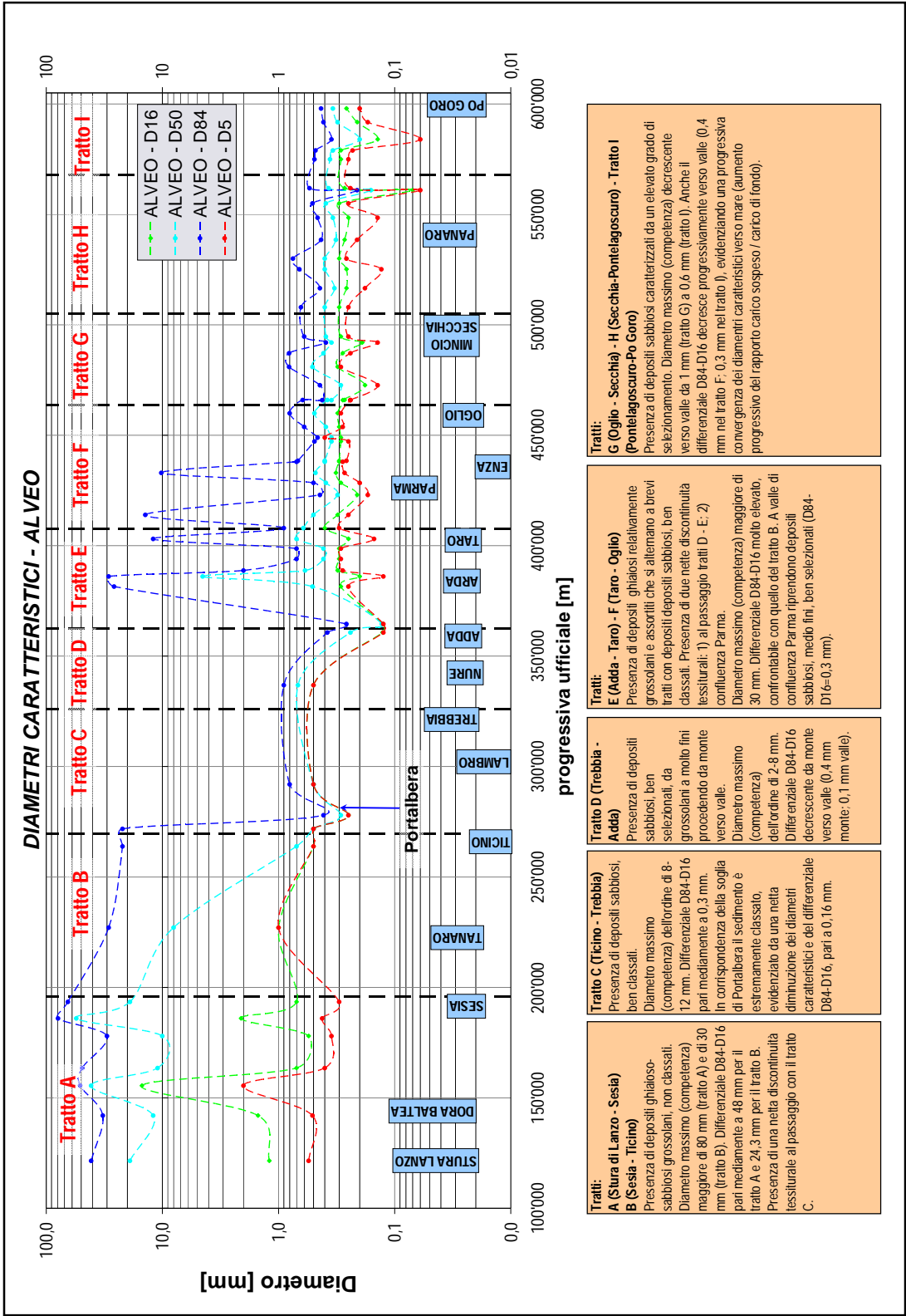
- Molto angoloso
- Angoloso
- Subangoloso
- Subarrotondato
- Arrotondato
- Molto arrotondato

X	X	X					X
	X		X				
					X		

*Tabella 1- Esempio di caratterizzazione morfometrica dei granuli sabbiosi: Qz=quarzo; Feld=feldspati alcalini; Pl=plagioclasti; Mi=miche; Px=pirosseni; Ol=olivina; Calc=calcite.*

Di seguito si riportano i cartogrammi contenenti i trend dei diametri caratteristici (D5, D16, D50, D84) della totalità dei campioni prelevati dalle barre e dall'alveo.





Si evidenzia il tratto D nel quale è presente lo sbarramento di Isola Serafini:

- *diametri caratteristici delle forme di fondo*: presenza di depositi sabbiosi ben selezionati.
- *diametri caratteristici dell'alveo*: presenza di depositi sabbiosi ben selezionati, da grossolani a molto fini. Diametro massimo dell'ordine di 2-8 mm. Differenziale D84-D16 decrescente da monte verso valle (0,4 mm a monte; 0,1 mm a valle).

Di seguito si riportano alcune foto delle sabbie presenti in sito.









### 3.3 La Spiaggia di Misano Adriatico

Prima di procedere con la valutazione dell'efficienza di ripascimento utilizzando le sabbie del Po, è opportuno fornire una descrizione del sito di intervento, Misano, e una analisi accurata delle batimetrie prima e dopo i ripascimenti eseguiti nei due progetti: Progettone 1 e Progettone 2.

Misano Adriatico è una località di circa 12000 abitanti che basa la propria economia locale sul turismo estivo. Confina a nord con il Comune di Riccione, mentre l'estremità meridionale, rappresentata da Portoverde, è separata dal Comune di Cattolica dal torrente Conca. Il Comune ha complessivamente un fronte a mare di 3.200 m quasi interamente protetto da opere di difesa rigida.

Trascurando l'area di foce del Conca e l'imboccatura di Portoverde la successione delle opere è la seguente (*figura 3.5*):

- 300 m di scogliera radente a protezione dell'abitato di Portoverde;
- 26 pennelli in calcestruzzo a protezione di un tratto di 1.600 m di litorale;
- barriera sommersa in sacchi pieni di sabbia in corrispondenza del tratto protetto con pennelli;
- 7 scogliere parallele a mare a protezione dei 700 m di litorale più prossimi al confine con Riccione.



*Figura 3.5: Opere di difesa a Misano Adriatico.*

Il tratto oggetto di studio si riferisce ai 1600 km del litorale di Misano protetto da pennelli e barriere sommerse in sacchi.

Tra il 1971 e il 1977, sono stati realizzati i 26 pennelli lunghi 60 m e distanti 60 m realizzati con un'anima in cemento armato rivestita da una mantellata in massi rocciosi che hanno di fatto stravolto i caratteri originari della spiaggia di Misano trasformandola in una spiaggia dominata dalla pietra (*figura 3.6*).



*Figura 3.6: Pennelli di Misano Adriatico visti dalla spiaggia di Porto Verde.*

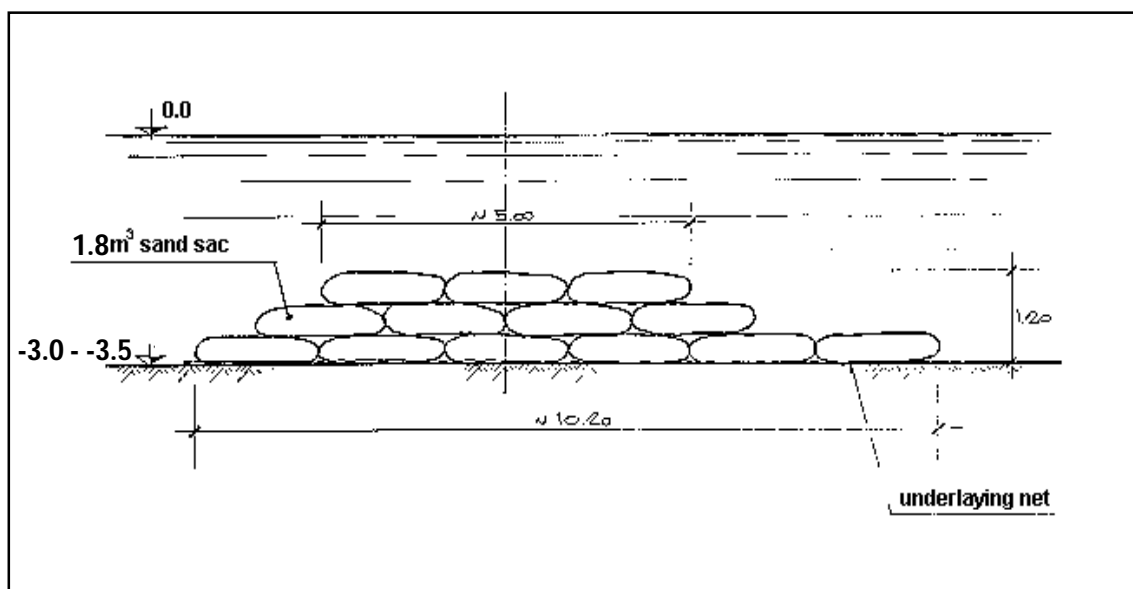
Questo intervento è riuscito solo in parte a bloccare l'erosione, tanto è che nel 1983-1984 si è realizzata la barriera longitudinale in sacchi.



Località	Periodo di esecuzione	Lunghezza intervenni (m)	Versamento iniziale (m <sup>3</sup> )	Versamenti di manutenzione (m <sup>3</sup> )
Misano	1983-84	1.600	135.000	50.000
Riccione	1983	1.000	75.000	70.000
Cesenatico	1983	800	65.000	80.000
Milano Marittima	1983	2.200	260.000	30.000
Lido di Classe	1989-90	500	35.000	---
Lido di Dante	1986	700	65.000	---
Lido Adriano	1989-91	4.500	900.000	---
C.Borsetti-Lamone	1989-91	2.100	330.000	---
C.Borsetti nord	1989-90	600	35.000	---

*Tabella 2: Interventi di difesa con barriere in sacchi realizzati lungo il litorale emiliano romagnolo nel periodo 1983-1992.*

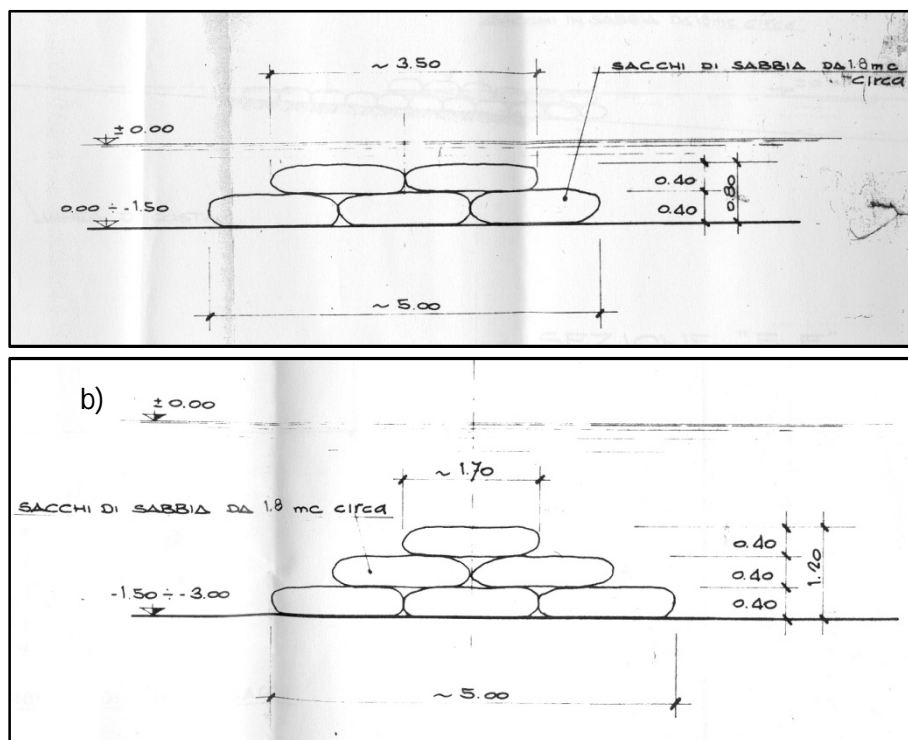
Nella figura sottostante si riporta la sezione tipo della barriera longitudinale a Misano, parallela alla spiaggia (*figura 3.7*): si nota che è costituita da 3 ordini sovrapposti di sacchi rispettivamente 6, 4, 3 sacchi. Le dimensioni dei sacchi utilizzati sono: 1.70x2.70x0.40 m.



*Figura 3.7: Sezione tipo della barriera in sacchi a Misano Adriatico.*

Nello stesso anno 6 pennelli (uno ogni cinque) sono stati rinforzati e da questi poi dipartono le barriere soffolte trasversali in sacchi (*figura 3.8*). Nel 1988 è stata eseguita una manutenzione particolare alle testate, nel 2003 una piccola manutenzione locale infine nel 2005 è stata eseguita una manutenzione diffusa.

L'azione congiunta effettuata dalle opere rigide presenti e dal versamento di sabbia ha fatto sì che il lento e progressivo arretramento della linea di riva venisse in qualche modo bloccato.



*Figura 3.8: Sezioni delle barriere trasversali: a) sezione più vicina alla riva, b) sezione a profondità maggiore.*

### **3.3.1 Evoluzione Morfologica**

Per analizzare l'evoluzione del tratto di litorale in oggetto, si devono utilizzare i dati topo-batimetrici acquisiti nelle varie campagne di monitoraggio.

L'analisi dei dati così ottenuti permette di riscontrare:

- il trend evolutivo del litorale;
- le modifiche su spiagge e fondali prodotte dalle opere a mare;
- gli spostamenti del materiale portato a ripascimento.

Si analizzano di seguito i dati forniti da ARPA, relativi a due campagne di monitoraggio:

- 2002-2005: Progettone 1;
- 2007-2009: Progettone 2.

#### **Campagna 2002-2005**

Le 5 campagne di rilievo disponibili nell'ambito del Progettone 1 sono:

- febbraio 2002, rilievo di prima pianta, cioè rilievo della situazione antecedente l'intervento di ripascimento;
- maggio 2002, rilievo di seconda pianta, cioè rilievo della situazione successiva l'intervento di ripascimento;
- febbraio 2003, rilievo di primo monitoraggio;
- febbraio 2004, rilievo di secondo monitoraggio;
- giugno 2005, rilievo di terzo monitoraggio.

Le mappe ottenute mostrano la variazione del fondale tramite la differenza di due batimetrie temporalmente successive.

Le tonalità di colore marrone, identificano zone di accumulo, quelle blu, di erosione.

Con il colore bianco, si individuano invece le zone in cui le variazioni, sia positive che negative, rientrano all'interno dei 10 cm, zone che si ritengono essere in equilibrio.

#### **Febbraio 2002-Maggio 2002**

Il volume portato a ripascimento nell'ambito del Progettone 1 è pari a 165300 mc.

A seguito del ripascimento si nota un allargamento della spiaggia dell'ordine di 30 m nella parte centrale e di circa 20 m nelle zone nord e sud.

### **Maggio 2002-Febbraio 2003**

Il confronto tra il monitoraggio del maggio 2002 e quello del febbraio 2003 permette di cogliere le variazioni morfologiche avvenute nei dieci mesi successivi al ripascimento.

All'interno dell'area di ripascimento si registra un volume di perdita pari a 66500 mc, cioè circa il 40 % del volume totale portato a ripascimento.

Se però il computo dei volumi tra i rilievi di seconda pianta e quelli di prima viene effettuato limitando il calcolo alla batimetrica dei 4 m (oltre la barriera in sacchi), si osserva una perdita di materiale pari a circa il 5% del volume totale apportato.

Questo significa che forti quantitativi di sabbia si sono spostati tra la barriera e la batimetrica dei 4 m, dando luogo ad una migrazione del materiale dalla spiaggia emersa a quella sommersa.

Per quanto riguarda l'evoluzione della linea di riva, in tale periodo si può notare un arretramento generalizzato su tutto il tratto, eccetto 400 m più a nord e 100 m a sud.

Per rendere più chiara la descrizione, si riporta di seguito, in tabella 3, il risultato del calcolo dei volumi effettuato per zone significative.

La spiaggia emersa e sommersa è stata suddivisa in 4 aree denominate A1, A2, A3 e CELLA (che coincide con l'area di ripascimento) secondo lo schema riportato in figura 3.9.

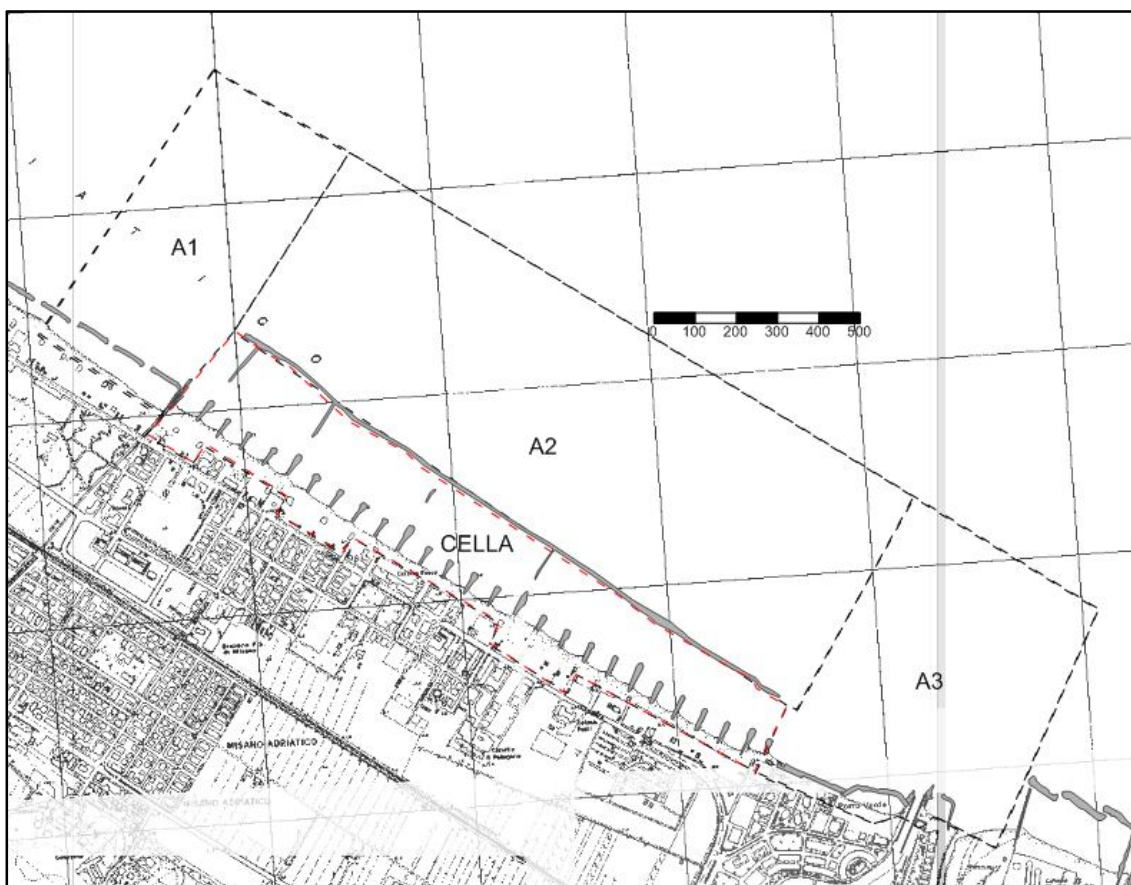


Figura 3.9: Aree di calcolo dei volumi depositati o accumulati.

AREA	VOLUME	m <sup>3</sup>
CELLA	Accumulo	31891
	Erosione	98448
	Tot. Erosione	-66557
A1	Accumulo	-
	Erosione	-
	Netto	-
A2	Accumulo	76932
	Erosione	1880
	Tot. Accumulo	+75052
A3	Accumulo	-
	Erosione	-
	Netto	-

Tabella 3: Volumi di materiale accumulato o eroso tra febbraio 2003 e maggio 2002.

### **Febbraio 2003-Febbraio 2004**

Al fine di contrastare le elevate perdite, nell'area protetta dalle opere, la Regione ed il Comune, hanno depositato 42650 mc di materiale.

All'interno dell'area di ripascimento si è verificata un'erosione di materiale di circa 12000 mc, al contrario se si esegue il calcolo dei volumi spingendosi fino alla batimetrica dei 4 m, si può notare un accumulo di materiale pari a 608 mc: questo significa che oltre 1100 mc si sono spostati tra la batimetrica dei 3 e dei 4 m.

La linea di riva è rimasta in sostanza invariata, salvo per i tratti sud e nord dell'area di ripascimento in cui si nota un leggero avanzamento.

Dall'analisi dei volumi (*tab. 4*) si nota che, come nel periodo precedente, continua ad esserci accumulo nella zona esterna alla barriera ed erosione nella parte oggetto di protezione.

AREA	VOLUME	m <sup>3</sup>
CELLA	Accumulo	29301
	Erosione	41461
	Tot. Erosione	-12159
A1	Accumulo	37884
	Erosione	3665
	Tot. Accumulo	+34219
A2	Accumulo	59590
	Erosione	18384
	Tot. Accumulo	+41206
A3	Accumulo	48431
	Erosione	14876
	Tot. Accumulo	+33554

*Tabella 4: Volumi di materiale accumulato o eroso tra febbraio 2003 e febbraio 2004.*

### **Febbraio 2004-Giugno 2005**

Anche in questo caso, per contrastare le elevate perdite, nell'area protetta dalle opere, sono stati versati 58800 mc di materiale.

Questa volta però, la cella oggetto di ripascimento, non si presenta in perdita ma è caratterizzata da un accumulo di materiale pari a 34444 mc, ciò potrebbe essere dovuto anche al ricarica della barriera effettuato tra il 2004 e il 2005 con 4800 sacchi posati, e alla manutenzione eseguita sui pennelli nel 2005.

Tra il secondo e il terzo monitoraggio, nonostante vi siano zone in erosione, complessivamente il bilancio di tutte le aree in cui si è calcolato il volume risulta positivo (*tab.5*).

La linea di riva è rimasta stabile.

AREA	VOLUME	m <sup>3</sup>
CELLA	Accumulo	65564
	Erosione	32119
	Tot. Accumulo	+33444
A1	Accumulo	103329
	Erosione	33697
	Tot. Accumulo	+69631
A2	Accumulo	189773
	Erosione	19003
	Tot. Accumulo	+170770
A3	Accumulo	64115
	Erosione	8565
	Tot. Accumulo	+55550

*Tabella 5: Volumi di materiale accumulato o eroso tra febbraio 2004 e giugno 2005.*

Complessivamente, se si sommano le perdite avvenute nei tre anni all'interno della cella, risultano pari a 17200 mc.

### **Febbraio 2002-Giugno 2005**

Confrontando il rilievo più recente, del giugno 2005, con quello concernente la situazione antecedente l'intervento di ripascimento, febbraio 2002, si può notare come tutta l'area soggetta a versamento abbia tratto beneficio dall'intervento, risultando essere quasi totalmente in accumulo. I pochi tratti in erosione sono localizzati tra la barriera sommersa e la linea di riva.

In tabella 6 si riporta il calcolo dei volumi effettuato tra giugno 2005 e febbraio 2002.

Complessivamente, tra il 2002 e il 2005, sono stati versati circa 266750 mc di sabbia:

- 165300 mc da accumuli sottomarini;
- 21250 mc da cave a terra;
- 23000 mc da scavi edili;
- 57200 mc da accumuli litoranei.

All'interno della cella sono rimasti 137592 mc: la spiaggia di Misano ha in pratica perso l'intero volume di sabbia sottomarina apportato nel 2002.



AREA	VOLUME	m <sup>3</sup>
CELLA	Accumulo	151529
	Erosione	13937
	Tot. Accumulo	+137592
A1	Accumulo	-
	Erosione	-
	Netto	-
A2	Accumulo	162679
	Erosione	5908
	Tot. Accumulo	+1156771
A3	Accumulo	-
	Erosione	-
	Tot. Accumulo	-

*Tabella 6: Volumi di materiale accumulato o eroso tra febbraio 2002 e giugno 2005.*

### **Campagna 2007-2009**

Le 4 campagne di rilievo disponibili nell'ambito del Progettone 2 sono:

- febbraio 2007, rilievo di prima pianta, cioè rilievo della situazione antecedente l'intervento di ripascimento;
- maggio 2007, rilievo di seconda pianta, cioè rilievo della situazione successiva all'intervento di ripascimento;
- ottobre 2008, rilievo di primo monitoraggio;
- luglio 2009, rilievo di secondo monitoraggio.

### **Giugno 2005-Febbraio 2007**

Nonostante l'apporto di 74450 mc di materiale, tra giugno 2005 e febbraio 2007, il monitoraggio evidenzia un netto prevalere dei processi erosivi su tutto il fondale sia nella zona interna, protetta da opere, che in quella esterna.

Eseguendo un calcolo dei volumi accumulati ed erosi all'interno dell'area di ripascimento, la variazione di volume è pari a -62751 mc, in pratica l'85% del materiale portato a ripascimento nel biennio è andato perso.

La linea di riva non presenta variazioni indicative: le sabbie portate a ripascimento hanno fatto sì che il profilo rimanesse stabile.

### **Febbraio 2007-Maggio 2007**

Il volume portato a ripascimento nell'ambito del Progettone 2 è pari a 149000 mc. Dal confronto tra il rilievo di prima e seconda pianta e quello di fine lavoro risulta che il ripascimento è stato eseguito in modo abbastanza omogeneo su tutta l'area in esame.

Si osserva inoltre come in seguito all'intervento, la linea di riva sia avanzata rispetto a quella propria della situazione precedente il ripascimento.

L'avanzamento risulta essere di circa 30 m nella parte centrale dell'area e di quasi 40 m nelle zone laterali.

### **Maggio 2007-Ottobre 2008**

Il confronto tra il monitoraggio del maggio 2007 e quello dell'ottobre 2008 permette di cogliere le variazioni morfologiche avvenute nei 17 mesi successivi al ripascimento.

Le consistenti perdite del primo periodo sono un aspetto tipico degli interventi di ripascimento, coerenti con l'idrodinamica del moto ondoso: nel momento in cui si compie un ripascimento, si va a modificare il profilo di equilibrio in cui si trova la spiaggia. In questo modo, l'onda che arriva in battigia trova un quantitativo di materiale che prima non era presente e tende ad eroderlo, trascinandolo verso largo. Questo fenomeno tende via via ad esaurirsi, fin quando la spiaggia si stabilizza su un nuovo profilo di equilibrio.

L'erosione maggiore è localizzata nell'intono dei pennelli, con picchi intorno al metro alle testate dei pennelli più lunghi e nelle fasce estreme nord sud. Il processo di migrazione della sabbia dalla spiaggia emersa a quella sommersa risulta essersi notevolmente accentuato. Infatti, la sabbia si è spostata in prossimità della barriera stessa, abbandonando le aree tra i pennelli in cui era stata versata. Il materiale tende ad accumularsi lungo il lato interno della barriera. Infine è visibile un accumulo di materiale intorno alle scogliere emerse a nord dell'area di ripascimento.

Tra i due monitoraggi si registra all'interno dell'area di ripascimento un volume di perdita pari a 52017 mc, cioè circa il 35% del volume totale versato. Da ricordare che in tale periodo, maggio 2007, ottobre 2008, sono stati apportati altri 30350 mc di materiale.

Anche in questo caso si riporta di seguito in tabella 7, il risultato del calcolo dei volumi effettuato per zone significative.

AREA	VOLUME	m <sup>3</sup>
CELLA	Accumulo	45890
	Erosione	97970
	Tot. Erosione	-52016
A1	Accumulo	18669
	Erosione	4641
	Tot. Accumulo	+14027
A2	Accumulo	24562
	Erosione	47973
	Tot. Erosione	-23410
A3	Accumulo	18640
	Erosione	5476
	Tot. Accumulo	+13164

Tabella 7: Volumi di materiale accumulato o eroso tra maggio 2007 e ottobre 2008.

### Ottobre 2008-Luglio 2009

Tra ottobre 2008 e luglio 2009, il comune ha eseguito un ulteriore ripascimento.

Eseguendo un calcolo dei volumi risulta che all'interno dell'area di ripascimento si sono accumulati 3660 mc di materiale.

Il calcolo dei volumi per aree significative è riportato in tabella 8.

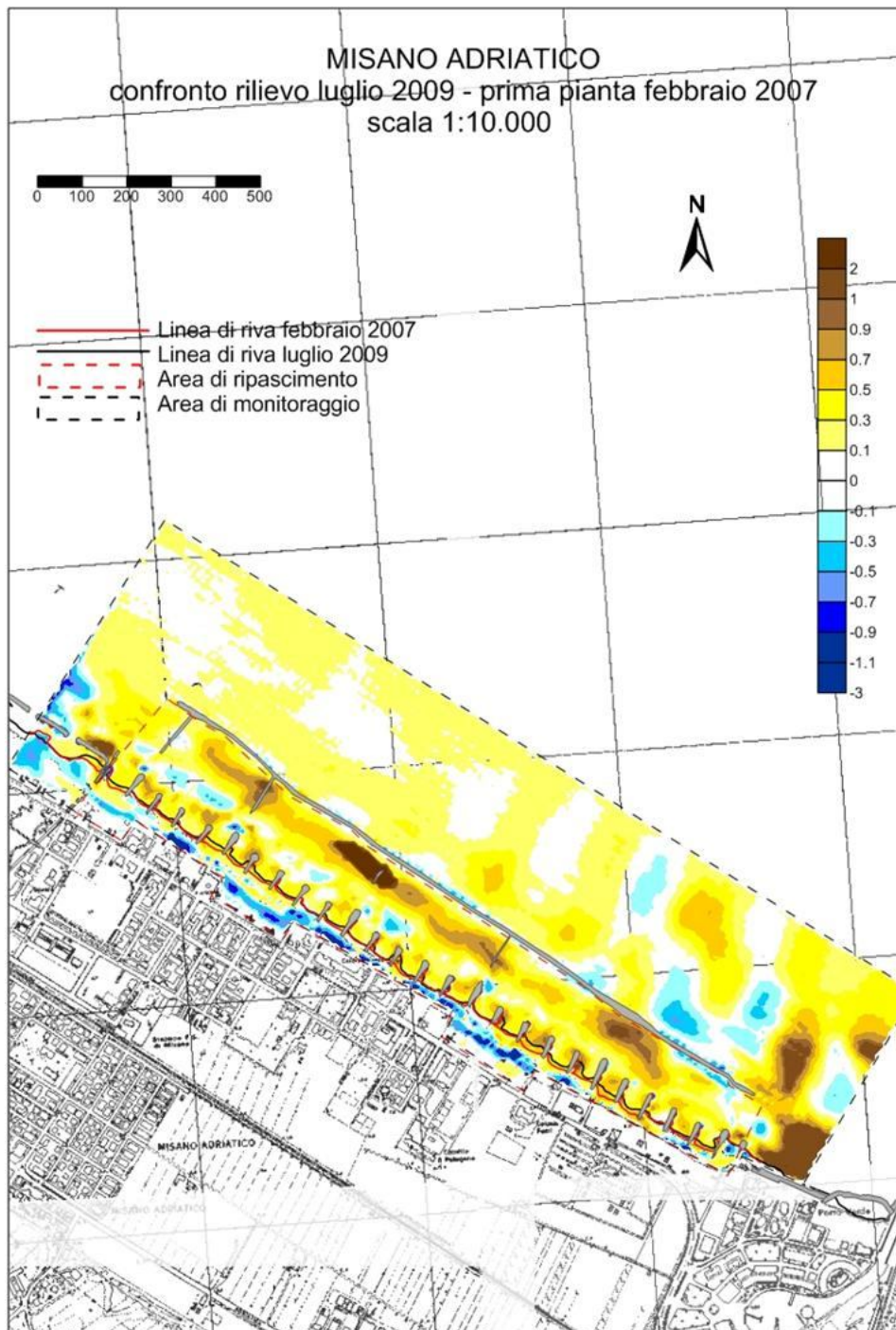
AREA	VOLUME	m <sup>3</sup>
CELLA	Accumulo	41536
	Erosione	37935
	Tot. Accumulo	+3601
A1	Accumulo	43168
	Erosione	38194
	Tot. Accumulo	+4974
A2	Accumulo	96047
	Erosione	1476
	Tot. Accumulo	+94571
A3	Accumulo	58603
	Erosione	5201
	Tot. Accumulo	+53401

Tabella 8: Volumi di materiale accumulato o eroso tra ottobre 2008 e luglio 2009.

Complessivamente se si sommano i volumi erosi nei due anni all'interno della cella, essi risultano pari a 136000 mc, che coincide in pratica con il materiale apportato dal mare nel 2007.

### **Febbraio 2007-Luglio 2009**

Confrontando il rilievo più recente del luglio 2009 con quello concernente la situazione antecedente l'intervento di ripascimento, febbraio 2007, si può notare come tutta l'area soggetta a versamento abbia tratto beneficio dall'intervento, risultando essere quasi totalmente in accumulo (*figura 3.10*). I pochi tratti di erosione sono localizzati lungo la spiaggia emersa.



*Figura 3.10: Confronto secondo monitoraggio 2009 prima pianta 2007.*

In tabella 9 si riporta il calcolo dei volumi effettuato tra il luglio 2009 e febbraio 2007.

AREA	VOLUME	m <sup>3</sup>
CELLA	Accumulo	129069
	Erosione	26656
	Tot. Accumulo	+102413
A1	Accumulo	19205
	Erosione	7704
	Tot. Accumulo	+11500
A2	Accumulo	98572
	Erosione	9650
	Tot. Accumulo	+88921
A3	Accumulo	43047
	Erosione	1493
	Tot. Accumulo	+41554

*Tabella 9: Volumi di materiale accumulato o eroso tra febbraio 2007 e luglio 2009.*

Complessivamente, tra il 2007 e il 2009, sono stati apportati all'interno della cella, circa 197700 mc e ne sono rimasti 102413 mc: la spiaggia di Misano ha in pratica perso il 30% del volume di sabbia sottomarina apportato nel 2007 e il 50% del materiale totale portato a ripascimento.

## **Conclusioni**

Dal calcolo dei volumi accumulati ed erosi si è osservato, all'interno dell'area di ripascimento compresa fra spiaggia emersa e barriera, quanto segue:

- dal 2002 al 2005 sono stati versati 266750 mc di materiale e all'interno della cella, ne sono rimasti 137592 mc, il 48% del totale è spostato;
- dal 2005 al 2007 il volume apportato è stato 74450 mc, il volume eroso 99918 mc;
- dal 2007 al 2009 la sabbia portata è stata 197700 mc, quella trattenuta all'interno della cella 102413 mc, pari al 52% del materiale versato.

Se il calcolo dei volumi viene però effettuato considerando una prima area fino alla batimetrica dei tre metri ed una seconda compresa tra la suddetta batimetrica e la barriera (imbasata alla -4m) si nota come la maggior parte del materiale si sia spostato dalla spiaggia emersa a quella sommersa, in particolare nella zona antistante la barriera (tra -3 e -.4m). Questo elevato movimento di materiale è un aspetto tipico degli interventi di ripascimento, in accordo con l'idrodinamica del moto ondoso: nel momento in cui si compie un ripascimento, si va a modificare il profilo di equilibrio in cui si trova la spiaggia, in questo modo l'onda che arriva in battigia trova un quantitativo di materiale che prima non era presente e quindi tende ad eroderlo.

La barriera, come suddetto, ha ben funzionato nel trattenere i volumi ma va considerato che per mantenere la linea di riva sono stati versati in media 42 m<sup>3</sup>/m anno di sabbia (67'200 m<sup>3</sup>/anno per l'intero tratto).

### 3.3.2 Analisi dei Sedimenti della spiaggia di Misano

Il litorale di Misano Adriatico, è stato oggetto di interventi di ripascimento:

- nel 2007, nell'ambito del Progettone 2, con sabbie sottomarine,;
- nel gennaio-maggio 2008 e gennaio-maggio 2009, con sabbie provenienti da scavi edili e accumuli litoranei, per ripascimenti di manutenzione.

Il monitoraggio sedimentologico a Misano, è consistito nell'analisi granulometrica di campioni prelevati lungo la spiaggia a varie profondità, in corrispondenza dei profili MI05 e MI18, nell'ambito di due campagne condotte ottobre 2008 e a maggio 2009.



*Figura 3.11 Misano Adriatico: ubicazione dei punti di prelievo dei campioni analizzati.*

Durante il primo monitoraggio, ottobre 2008, le profondità di rilievo di progetto, coincidevano con quelle reali di prelievo mentre, nel secondo monitoraggio, maggio 2009, a seguito dei cambiamenti morfologici del fondo, le profondità di campionamento



sono cambiate. Al fine di rilevare eventuali cambiamenti tessiturali delle sabbie presenti nelle spiagge oggetto di ripascimento, i dati granulometrici ottenuti da queste due campagne sono stati confrontati con le analisi effettuate su campioni prelevati a Misano nel marzo 2003, lungo il profilo MI13 nell'ambito del Progettone 1.

I campioni sulla spiaggia emersa sono stati prelevati con una semplice paletta, mentre quelli della parte sommersa sono stati ottenuti tramite l'utilizzo di una benna a ritenzione di tipo Van Veen.

Le caratteristiche granulometriche sono state determinate seguendo le indicazioni riportate dal Decreto Ministeriale del 13 settembre 1999 “ Approvazione dei metodi ufficiali per l'analisi chimica del suolo” (Gazzetta Ufficiale serie generale n.185 del 21 Ottobre 1999).

L'analisi sedimentologica condotta sui campioni, è stata articolata nelle seguenti fasi:

- eliminazione della sostanza organica e dei sali solubili eventualmente presenti;
- separazione dello scheletro ( $> 2\text{mm}$ ) costituito dal materiale organogeno (frammenti di conchiglie);
- separazione della frazione sabbiosa dalla frazione fine (limo e argilla) mediante setacciatura a umido;
- determinazione della frazione sabbiosa mediante setacciatura;
- determinazione della frazione fine mediante il metodo della pipetta (legge di Stokes).

I campioni sono stati classificati sulla base della scala granulometrica di Udden-Wentworth (*tabella 10*).

A partire dalle analisi granulometriche sono stati ottenuti, tramite il programma di calcolo Gradistat, i seguenti parametri statistici:

- diametro medio;
- coefficiente di cernita e coefficiente di asimmetria definiti secondo Folk and Ward (*tabella 11*).

mm	Phi $\phi$	Udden-Wentworth size class	
		Boulder	Ghiaia
256	-8	Cobble	
64	-6	Pebble	
4	-2	Granule	
2.00	-1.0		Sabbia grossolana
1.68	-0.75	Very coarse sand	
1.41	-0.5		
1.19	-0.25		
1.00	0	Coarse sand	
0.84	0.25		
0.71	0.5		
0.59	0.75		
0.50	1.00		Sabbia media
0.42	1.25	Medium sand	
0.35	1.5		
0.30	1.75		
0.25	2.00		Sabbia fine
0.210	2.25	Fine sand	
0.177	2.5		
0.149	2.75		
0.125	3.00		Sabbia molto fine
0.105	3.25	Very fine sand	
0.088	3.5		
0.074	3.75		
0.0625	4.00		Silt
0.053	4.25	Coarse silt	
0.044	4.5		
0.037	4.75		
0.031	5.00	Medium silt	
0.0156	6.00	Fine silt	
0.0078	7.00	Very fine silt	
0.0039	8.00		Argilla
0.0020	9.00	Clay	
0.00098	10.00		
0.00049	11.00		
0.00024	12.00		
0.00012	13.00		
0.00006	14.00		

Tabella 10: Scala granulometrica di Udden- Wentworth .

Mean	Standard Deviation
$M_G = \exp \frac{\ln P_{16} + \ln P_{50} + \ln P_{84}}{3}$	$\sigma_G = \exp \left( \frac{\ln P_{16} - \ln P_{84}}{4} + \frac{\ln P_5 - \ln P_{95}}{6.6} \right)$

Skewness
$Sk_G = \frac{\ln P_{16} + \ln P_{84} - 2(\ln P_{50})}{2(\ln P_{84} - \ln P_{16})} + \frac{\ln P_5 + \ln P_{95} - 2(\ln P_{50})}{2(\ln P_{25} - \ln P_5)}$

Sorting ( $\sigma_G$ )	Skewness ( $Sk_G$ )
Very well sorted	< 1.27
Well sorted	1.27 – 1.41
Moderately well sorted	1.41 – 1.62
Moderately sorted	1.62 – 2.00
Poorly sorted	2.00 – 4.00
Very poorly sorted	4.00 – 16.00
Extremely poorly sorted	> 16.00

Tabella 11: Formule statistiche di Folk and Ward (1957) utilizzate per il calcolo dei i parametri statistici. L'unità di misura delle granulometrie è il  $\mu m$ .

I risultati delle analisi granulometriche (tabelle 12, 13) sono stati elaborati con il preprogramma di calcolo Gradistat che ha permesso di ottenere grafici e parametri granulometrici tramite i quali sono stati descritti dal punto di vista tessiturale i sedimenti presenti sulla spiaggia in esame.

SEZIONE	MI05 (T)	MI05 (0)	MI05 (1)	MI05 (2)	MI05 (4)	MI18 (T)	MI18 (0)	MI18 (1)	MI18 (2)	MI18 (4)
QUOTA	1,00	0,00	-1,00	-2,50	-4,00	1,00	0,00	-1,00	-2,50	-4,00
Scheletro	0,00	0,00	0,00	0,40	0,50	0,00	2,25	0,00	0,00	0,00
Sabbia molto grossolana	0,60	0,10	0,30	0,30	0,20	0,60	1,47	1,70	1,00	0,20
Sabbia grossolana	0,90	1,50	0,40	0,60	0,40	0,60	4,01	0,90	1,10	0,10
Sabbia media	16,90	35,60	3,00	4,28	4,48	14,00	22,78	5,90	6,90	1,40
Sabbia fine	64,70	60,00	82,90	80,48	83,58	74,10	64,81	80,60	80,00	77,50
Sabbia molto fine	8,60	0,50	10,80	8,57	5,77	7,40	0,88	7,90	8,40	17,20
Silt	6,00	1,80	1,10	4,08	3,78	3,30	3,52	2,00	1,30	1,80
Argilla	2,30	0,50	1,50	1,29	1,29	0,00	0,29	1,00	1,30	1,80

Tabella 12: Risultati delle analisi granulometriche effettuati su campioni prelevati a Misano nell'ambito del primo monitoraggio del Progettone 2 (ottobre 2008).

SEZIONE	MI05 (T)	MI05 (0)	MI05 (1)	MI05 (2)	MI05 (4)	MI18 (T)	MI18 (0)	MI18 (1)	MI18 (2)	MI18 (4)
QUOTA	0.95	0.22	-0.92	-2,50	-3.90	0.43	-0.21	-0.86	-2,66	-3.76
Scheletro	5,3	0,0	0,7	0,0	0,0	2,7	5,4	0,0	0,0	0,0
Sabbia molto grossolana	0,66	0,6	1,49	0,4	0,4	2,24	3,50	1,2	0,2	0,5
Sabbia grossolana	0,95	0,4	1,89	1,8	0,9	3,31	3,22	1,4	0,2	0,3
Sabbia media	16,67	13,9	14,41	6,7	4,2	17,91	18,35	18,2	0,3	1,2
Sabbia fine	69,23	76,5	71,73	83,7	56,0	67,56	64,04	70,2	68,7	50,3
Sabbia molto fine	3,98	5,9	6,16	4,8	33,2	3,31	4,45	5,6	25,4	42,0
Silt	1,80	1,70	2,38	2,60	3,30	2,53	0,76	3,40	3,70	3,40
Argilla	2,30	0,50	1,50	1,29	1,29	0,00	0,29	1,00	1,30	2,3

*Tabella 13: Risultati delle analisi granulometriche effettuati su campioni prelevati a Misano nell'ambito del secondo monitoraggio del Progettone 2 (maggio 2009).*

Le curve cumulative della distribuzione granulometrica dei campioni prelevati lungo entrambi i profili del Progettone 2, presentano la pendenza accentuata tipica di sedimenti omogenei di ambiente di posizione di spiaggia.

Confrontando le situazioni riscontrate nei due monitoraggi si rilevano i seguenti cambiamenti:

- con il secondo monitoraggio, i campioni prelevati alla profondità (1) lungo entrambi i profili presentano un aumento della granulometria della porzione sabbiosa (aumenta la percentuale di sabbia media e grossolana rispetto alla sabbia fine;
- con il secondo monitoraggio, nei campioni prelevati alla profondità di (4) lungo la sezione MI05 e (2) e (4) lungo il profilo MI18, si rileva una diminuzione della granulometria (aumenta la percentuale della sabbia molto fine rispetto a quella fine.

La tendenza nel tempo all'aumento della granulometria a minori profondità e alla diminuzione a profondità maggiori è attribuibile alla naturale ridistribuzione prodotta dal moto ondoso dei sedimenti nella spiaggia sommersa che tende a concentrare le sabbie più grossolane vicino a riva e quelle più fini in profondità.

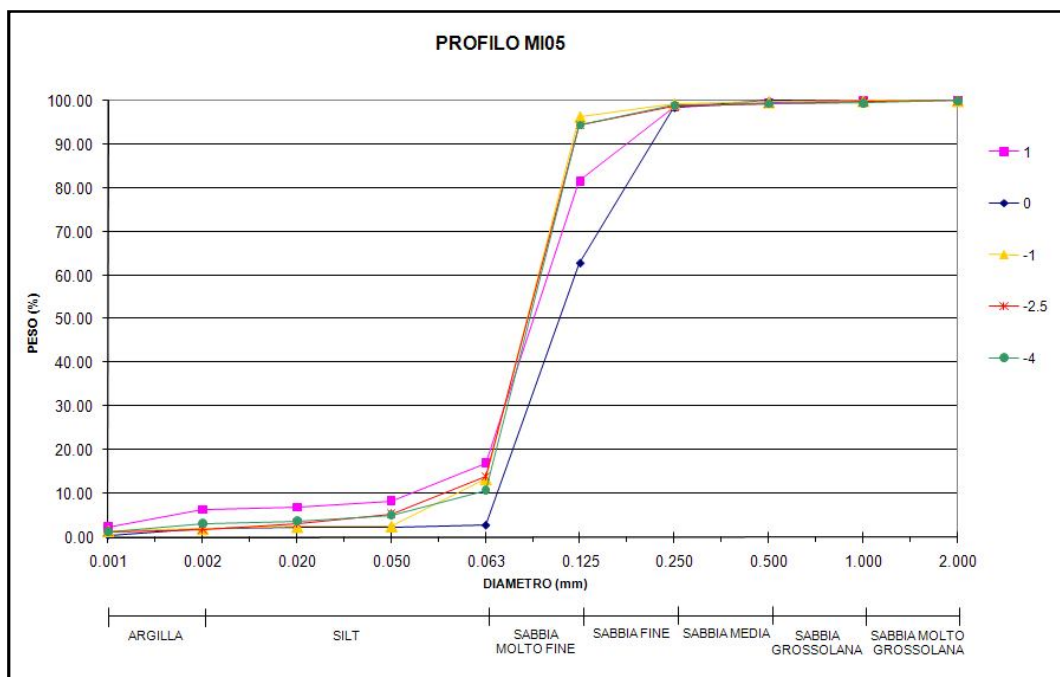


Figura 3.11: Curve granulometriche cumulative relative alla sezione MI05, primo monitoraggio

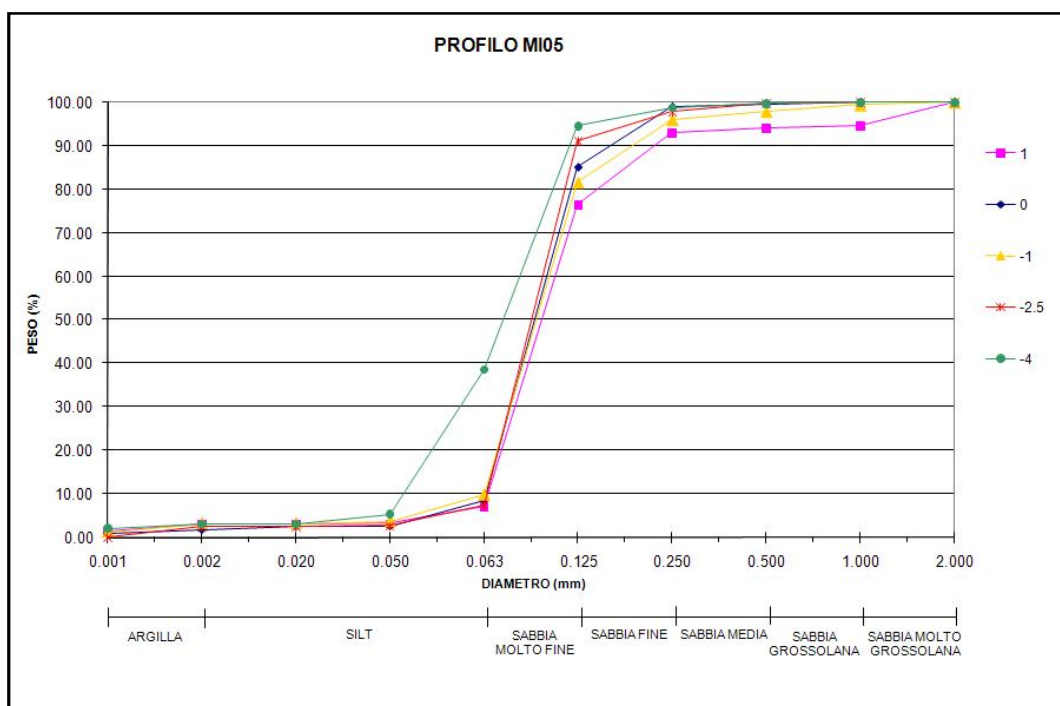


Figura 3.12: Curve granulometriche cumulative relative alla sezione MI05, secondo monitoraggio

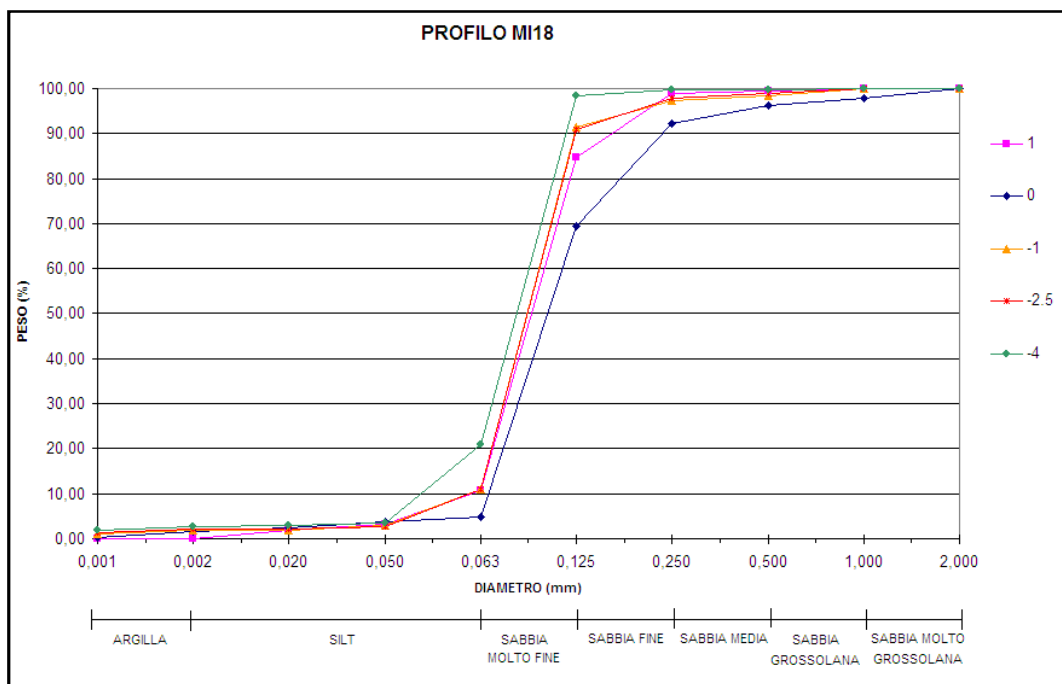


Figura 3.13: Curve granulometriche cumulative relative alla sezione MI18, primo monitoraggio

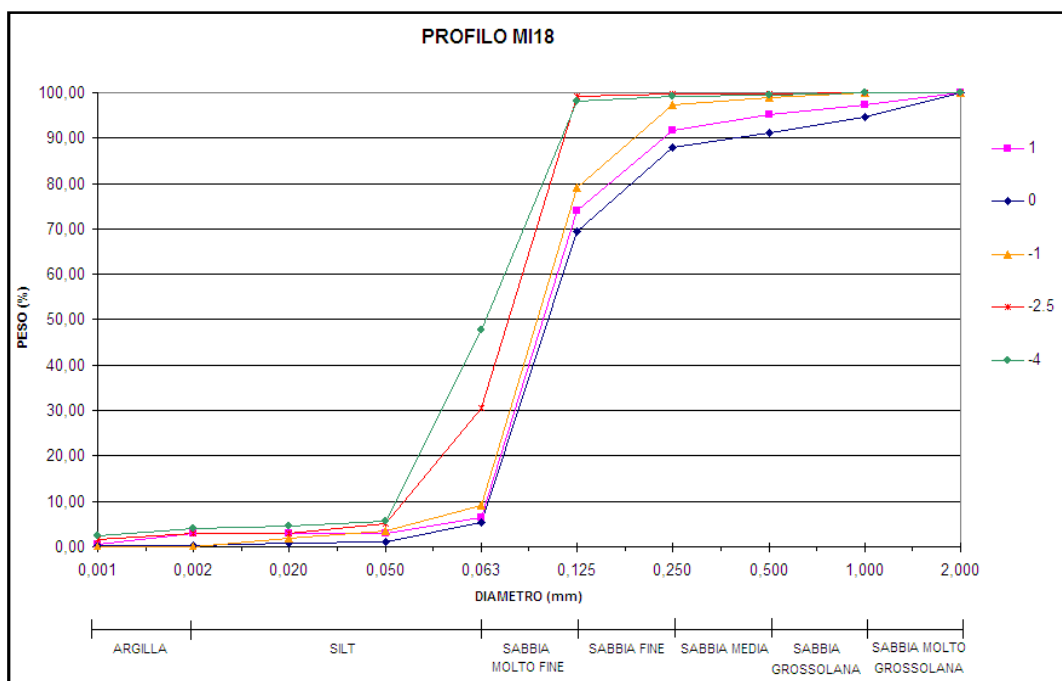


Figura 3.14: Curve granulometriche cumulative relative alla sezione MI18, secondo monitoraggio

La tendenza rilevata con l'analisi della distribuzione granulometrica lungo i profili MI05 e MI18, è confermata dal confronto dei valori del diametro medio dei campioni (tabelle ;figura ).

Il diametro medio rappresenta una media delle dimensioni dei granuli che costituiscono il campione ed identifica il valore medio della distribuzione.

Anche se tutti i campioni prelevati presentano un granulo medio ricadente nel campo della sabbia fine, facendo riferimento alla spiaggia emersa e in particolare alla quota (T) si nota che nel 2009, il diametro medio aumenta rispetto al 2008 e tende allo stesso valore del 2003.

Facendo riferimento alle quote (0) e (1) invece, si nota come il diametro medio rispetto al 2003 sia diminuito lungo entrambi i profili, alla profondità (2) sia rimasto in sostanza invariato con una leggera diminuzione lungo il profilo MI18.

Alla profondità (4) invece, negli anni si è avuto un aumento del diametro passando da sabbia molto fine nel 2003 a sabbia fine nel 2009.

CAMPIONI	QUOTA	CLASSIFICAZIONE DESCRITTIVA	DIAMETRO MEDIO (mm)	COEFF. DI CERNITA ( $\mu\text{m}$ )	COEFF. DI ASIMMETRIA (*)
MI05 (T)	1.00	Sabbia fine	0.179	2.215	-0.262
MI05 (0)	0.00	Sabbia fine	0.228	1.544	0.186
MI05 (1)	-1.00	Sabbia fine	0.170	1.386	-0.190
MI05 (2)	-2.50	Sabbia fine	0.171	1.456	-0.185
MI05 (4)	-4.00	Sabbia fine	0.173	1.441	-0.191
MI18 (T)	1.00	Sabbia fine	0.181	1.523	-0.019
MI18 (0)	0.00	Sabbia fine	0.223	1.706	0.382
MI18 (1)	-1.00	Sabbia fine	0.175	1.479	-0.025
MI18 (2)	-2.50	Sabbia fine	0.175	1.473	-0.022
MI18 (4)	-4.00	Sabbia fine	0.154	1.470	-0.287

*Tabella 14: Risultati delle elaborazioni statistiche effettuate con il programma GRADISTAT a partire dalle analisi granulometriche dei campioni prelevati con il primo monitoraggio (ottobre 2008). (\*) Il coefficiente di asimmetria è stato ottenuto partendo da granulometrie espresse in  $\mu\text{m}$ .*

CAMPIONI	QUOTA	CLASSIFICAZIONE DESCRITTIVA	DIAMETRO MEDIO (mm)	COEFF. DI CERNITA ( $\mu\text{m}$ )	COEFF. DI ASIMMETRIA (*)
MI05 (T)	0.95	Sabbia fine	0.208	2.017	0.371
MI05 (0)	0.22	Sabbia fine	0.182	1.488	0.006
MI05 (1)	-0.92	Sabbia fine	0.190	1.603	0.069
MI05 (2)	-2,50	Sabbia fine	0.178	1.432	0.017
MI05 (4)	-3.90	Sabbia fine	0.135	1.621	-0.166
MI18 (T)	0.43	Sabbia fine	0.215	1.821	0.336
MI18 (0)	-0.21	Sabbia fine	0.230	2.024	0.474
MI18 (1)	-0.86	Sabbia fine	0.196	1.603	0.083
MI18 (2)	-2,66	Sabbia fine	0.140	1.551	-0.297
MI18 (4)	-3.76	Sabbia fine	0.126	1.615	-0.122

*Tabella 15: Risultati delle elaborazioni statistiche effettuate con il programma GRADISTAT a partire dalle analisi granulometriche dei campioni prelevati con il primo monitoraggio (maggio 2009). (\*) Il coefficiente di asimmetria è stato ottenuto partendo da granulometrie espresse in  $\mu\text{m}$ .*



CAMPIONI	QUOTA	CLASSIFICAZIONE DESCRITTIVA	DIAMETRO MEDIO (mm)	COEFF. DI CERNITA ( $\mu\text{m}$ )	COEFF. DI ASIMMETRIA (*)
MI13 (T)	1.00	Sabbia fine	0.213	1.729	0.051
MI13 (0)	0.00	Sabbia fine	0.253	1.864	0.338
MI13 (1)	-1.00	Sabbia fine	0.238	1.854	0.431
MI13 (2)	-2.50	Sabbia fine	0.172	1.612	-0.062
MI13 (4)	-4.00	Sabbia molto fine	0.084	1.527	0.091

Tabella 16: Risultati delle elaborazioni statistiche effettuate con il programma GRADISTAT a partire dalle analisi granulometriche dei campioni prelevati nel marzo 2003. (\*) Il coefficiente di asimmetria è stato ottenuto partendo da granulometrie espresse in  $\mu\text{m}$ .

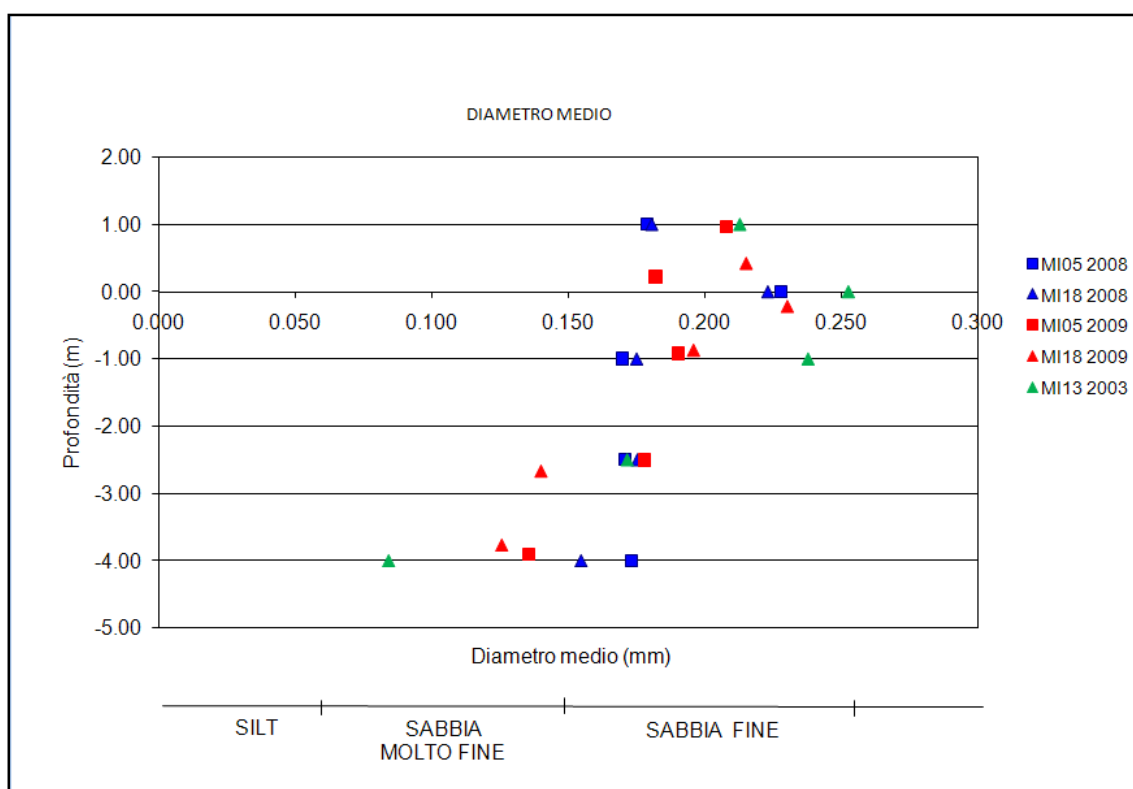


Figura 3.11: Diametro medio alle diverse profondità dei campioni prelevati lungo i profili MI05 e MI18, nell'ambito del primo monitoraggio (2008) e del secondo monitoraggio (2009) del Progettone 2, e lungo la sezione MI13, nel 2003 per il Progettone 1.

La classazione, è la distribuzione della popolazione intorno alla media, indica quanto la distribuzione granulometrica differisca dal valore del diametro medio (deviazione standard); è indipendente dal diametro medio ed indica, in generale, il grado di cernita sedimentaria a cui è stato sottoposto un sedimento.

La classazione esprime la capacità selettiva del mezzo di trasporto, cioè la sua capacità di prelevare e/o trasportare granuli. I sedimenti eolici e di spiaggia, ad esempio, sono tra

i meglio classati in natura. Più è piccolo il coefficiente di classazione, migliore è il grado di cernita del materiale e viceversa.

Per quanto concerne la spiaggia sommersa dal 2003 al 2009, non si nota alcuna differenza, infatti, tutti i campioni si presentano ben assortiti. Alla profondità (1), si ha un aumento del grado di cernita; si passa infatti da campioni moderatamente assortiti del 2003 a campioni ben assortiti del 2009 lungo entrambi i profili.

Nella spiaggia emersa, si passa da campioni moderatamente assortiti a campioni poco assortiti del 2009.

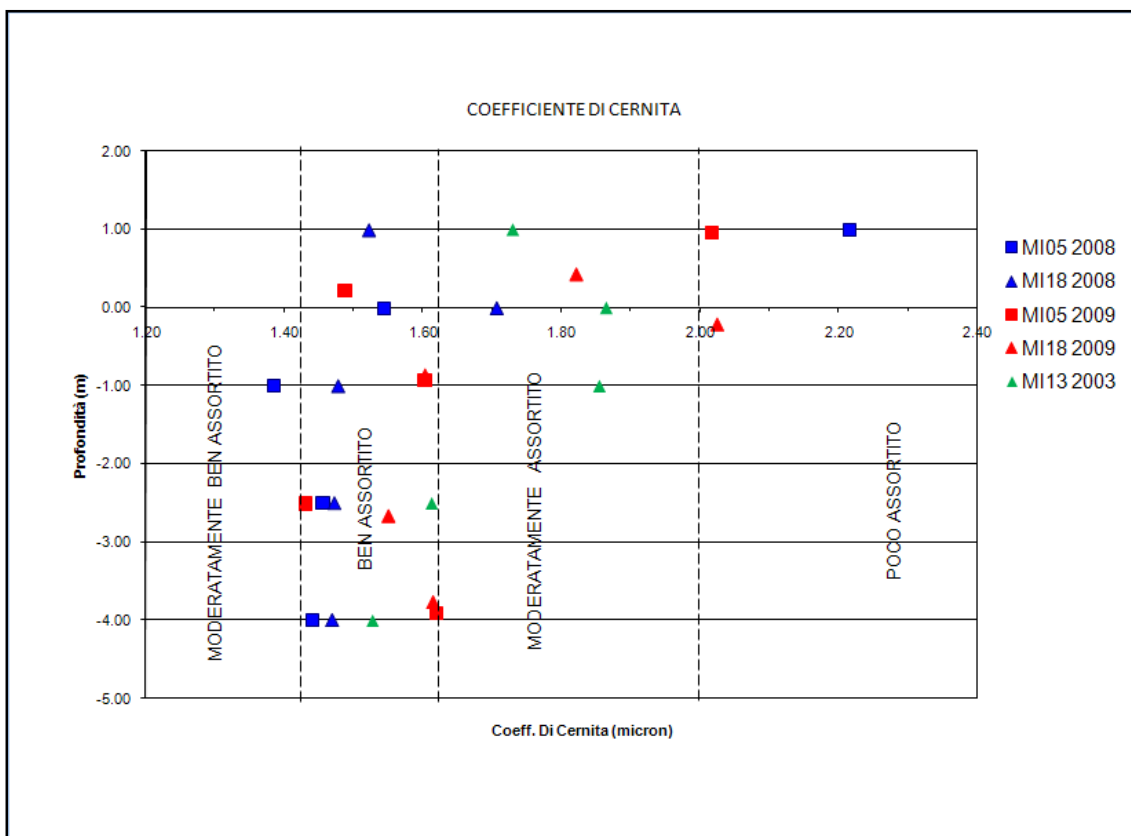


Figura 3.12: Coefficiente di cernita alle diverse profondità relativo ai profili MI05 e MI18, primo monitoraggio (2008) e secondo monitoraggio (2009) e alla sezione MI13 rilevata per il Progettone 1 (2003).

Il coefficiente di asimmetria individua il grado di distribuzione granulometrica indipendentemente dal classamento. Evidenzia l'omogeneità della popolazione granulometrica, cioè se i valori sono distribuiti equamente da una parte all'altra della popolazione centrale, o baricentro della curva. Essa ha segno negativo se la curva ha una coda verso diametri sottili e segno positivo se la curva ha una coda verso i diametri

grossolani; una curva perfettamente simmetrica è definita con simmetria zero (tale ragionamento è valido se il diametro è espresso in micron).

L'asimmetria è dovuta ad aggiunte o sottrazioni di materiale nelle code della curva granulometrica originaria.

Lungo la spiaggia emersa si nota o un'assenza di simmetria o la tendenza a un'asimmetria verso il grossolano ed è quello che normalmente accade: infatti la frazione sottile tende ad essere allontanata dall'azione del moto ondoso. Per lo stesso motivo lungo la spiaggia sommersa, non ci stupisce la tendenza verso il fine; in particolare lungo la sezione MI18 alla profondità (1) e (4) si conservano rispettivamente la simmetria e l'asimmetria verso il fine, mentre alla quota (2) si ha il passaggio da campione simmetrico ad asimmetrico verso il fine. Lungo il profilo MI05 si ha a tutte le profondità, tra i due monitoraggi, una diminuzione del coefficiente di asimmetria.

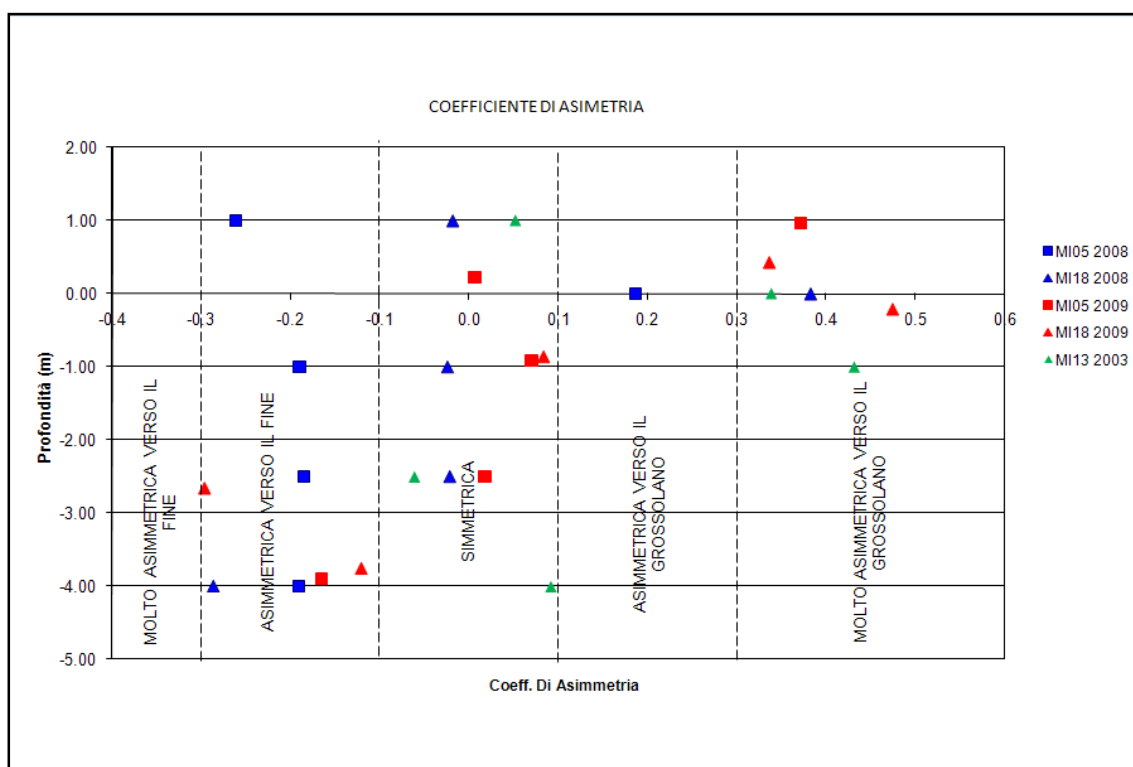


Figura 3.13: Coefficiente di asimmetria alle diverse profondità relativo ai profili MI05 e MI18, primo monitoraggio (2008) e secondo monitoraggio (2009) e alla sezione MI13 rilevata per il Progettone 1 (2003).

I parametri sedimentologici analizzati, confermano che lungo il profilo di spiaggia sono in atto processi che tendono a ridistribuire il sedimento concentrando le sabbie più grossolane a minore profondità e le sabbie più fini a maggiori profondità.

Tali processi sono particolarmente attivi nella spiaggia di Misano che, com'è noto, è contraddistinta da un'energia del moto ondoso piuttosto elevata e da un fondale più acclive rispetto alla media del litorale regionale.

Il dato sedimentologico e il fatto che nella zona è stato effettuato nel 2007 un ripascimento con sabbie sottomarine con diametro medio paria 0,18 mm (sabbia fine), seguito da altri interventi di manutenzione, suggeriscono che almeno in parte il fenomeno potrebbe essere il risultato dello spostamento della porzione più fine del materiale apportato artificialmente a maggiore profondità, in condizioni energetiche meno elevate e quindi di equilibrio per quel tipo di granulometria.

### 3.3.3 Elaborazione del Clima Meteomarinò del Paraggio

Per poter procedere con l'analisi del trasporto solido di materiale lungo riva, occorre conoscere il clima rappresentativo del paraggio.

I dati necessari per la ricostruzione del clima meteomarinò provengono tutti dalla boa di rilevazione della stazione metanifera Azalea prospiciente alla città di Rimini. La stazione di estrazione ha le seguenti caratteristiche:

<b>Piattaforma</b>	ENI - AZALEA	<b>Fondale</b>	19 mt
<b>Codice</b>	R07	<b>Prof. correntometro</b>	5 mt
<b>Latitudine</b>	44° 10' 020" N	<b>Altezza Anemometro</b>	29 mt
<b>Longitudine</b>	12° 43' 180" E	<b>Distanza da riva</b>	12 miglia nautiche

*Tabella 17 – dati della piattaforma di registrazione*

Le registrazioni, pervenute ad intervalli regolari di mezz'ora, partono dal 1 gennaio 1993 al 31 dicembre 2002 e riguardano dati meteorologici quali:

- temperatura [°C];
- umidità dell'aria [%];
- radiazione solare [W/mq];
- velocità del vento  $W_x$ ,  $W_y$  [Nodi] e sua direzione [°Nord];
- dati ondametrici quali altezza d'onda significa e altezza d'onda massima [mt], periodo significativo e periodo massimo [sec], livello del medio mare [mt];
- dati correntometrici ovvero intensità delle correnti [mt/sec] e direzione [°Nord].

Ricostruire il clima meteomarinario significa ricostruire una tabella con frequenza di accadimento delle altezze d'onda in funzione di altre variabili connesse. Nel nostro caso considereremo le coppie altezza d'onda significativa  $H_s$  abbinata:

- al periodo significativo  $T_s$
- alla direzione di incidenza ondosa DIR, supposta coincidente con quella del vento.

La tabella esprimerà per ogni cella (cioè per ogni coppia di  $H_s$  e DIR o  $T_s$ ) la frequenza relativa di accadimento, cioè quante volte è stato osservato una tale abbinamento sulla totalità dei dati registrati. Occorre pertanto dividere in classi di appartenenza le variabili prese in considerazione.

- Per le onde si è scelto un intervallo variabile da 0 a 5 mt con *step* di 0,5 mt;
- per DIR l'angolo giro a *step* di  $10^\circ$  ;
- per  $T_s$  infine da 0 a 10 secondi a passi di un secondo.

Il risultato sarà una matrice contenente numeri in percentuale da 0 a 100 e dove la somma degli elementi sulle righe e sulle colonne darà la certezza (vale a dire 100%). Avendo implementato un codice in Matlab è stato possibile eseguire in automatico questa operazione ed estrarre così le matrici in maniera rapida.

Di seguito si riportano le tabelle riportanti le coppie:

- $H_s - T_s$ ;
- $H_s - \text{DIR}$ .

$T_s$ [sec]	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	
0.0 - 0.5	12.29	38.27	7.67	1.62	0.33	0.05		<b>60.25</b>
0.5 - 1.0	0.19	6.80	9.91	3.48	1.16	0.15		<b>21.69</b>
1.0 - 1.5	0.45	0.88	2.29	2.90	0.83	0.29	0.01	<b>7.64</b>
1.5 - 2.0	0.19	0.65	0.34	1.51	0.51	0.14	0.01	<b>3.35</b>
2.0 - 2.5	0.12	0.67	0.27	0.30	0.84	0.04		<b>2.23</b>
2.5 - 3.0	0.29	0.83	0.44	0.20	0.42	0.06		<b>2.24</b>
3.0 - 3.5	0.46	1.01	0.54	0.17	0.09	0.10		<b>2.36</b>
3.5 - 4.0	0.03	0.07	0.03	0.02	0.01	0.07		<b>0.22</b>
$H_s$ [mt]	<b>14.01</b>	<b>49.17</b>	<b>21.49</b>	<b>10.19</b>	<b>4.17</b>	<b>0.91</b>	<b>0.04</b>	<b>100.0</b>

Tabella 18 - clima  $h_s - t_s$  dalla piattaforma azalea nel periodo '93 - '02

DIREZ. [°]	0° 10°	10° 20°	20° 30°	30° 40°	40° 50°	50° 60°	60° 70°	70° 80°	80° 90°	90° 100°	100° 110°	110° 120°
0.0 - 0.5	1.18	0.97	0.97	0.99	1.07	0.85	0.91	1.06	1.23	1.41	1.82	2.33
0.5 - 1.0	0.29	0.25	0.23	0.27	0.29	0.63	0.70	0.72	0.74	0.90	0.60	0.83
1.0 - 1.5	0.07	0.08	0.12	0.13	0.23	0.32	0.36	0.28	0.30	0.25	0.50	0.61
1.5 - 2.0	0.03	0.04	0.05	0.10	0.18	0.27	0.27	0.23	0.14	0.08	0.04	0.04
2.0 - 2.5	0.01	0.01	0.03	0.07	0.12	0.19	0.19	0.15	0.06	0.03	0.02	0.01
2.5 - 3.0			0.02	0.04	0.06	0.12	0.09	0.05	0.02	0.01		
3.0 - 3.5				0.01	0.03	0.05	0.04	0.01				
3.5 - 4.0					0.01	0.02	0.02					
4.0 - 4.5						0.01	0.01					
H <sub>s</sub> [mt]	1.59	1.36	1.41	1.60	1.99	2.46	2.58	2.51	2.50	2.68	2.98	3.82

Tabella 19 - clima h<sub>s</sub> – dir dalla piattaforma azalea dal '93 al '02

DIREZ. [°]	120° 130°	130° 140°	140° 150°	150° 160°	160° 170°	170° 180°	180° 190°	190° 200°	200° 210°	210° 220°	220° 230°	230° 240°
0.0 - 0.5	3.10	2.07	1.00	0.89	1.02	1.14	1.49	1.93	2.05	1.77	1.51	1.28
0.5 - 1.0	1.18	0.85	0.36	0.36	0.43	0.39	0.46	0.61	0.66	0.47	0.32	0.24
1.0 - 1.5	0.99	0.45	0.24	0.09	0.08	0.09	0.09	0.15	0.11	0.09	0.06	0.05
1.5 - 2.0	0.05	0.05	0.02	0.20	0.25	0.22	0.30	0.37	0.03	0.02	0.03	0.03
2.0 - 2.5	0.01	0.01							0.35	0.27	0.22	0.21
2.5 - 3.0												
3.0 - 3.5												
3.5 - 4.0												
4.0 - 4.5												
H <sub>s</sub> [mt]	5.34	3.43	1.62	1.54	1.79	1.84	2.35	3.06	3.22	2.62	2.15	1.81

Tabella 20 - clima h<sub>s</sub> – dir dalla piattaforma azalea dal '93 al '02

DIREZ. [°]	240° 250°	250° 260°	260° 270°	270° 280°	280° 290°	290° 300°	300° 310°	310° 320°	320° 330°	330° 340°	340° 350°	350° 360°	
0.0 - 0.5	1.49	1.54	1.44	1.75	2.45	3.12	3.96	3.98	2.55	1.70	1.34	1.21	60.57
0.5 - 1.0	0.26	0.26	0.22	0.30	0.51	1.09	1.96	1.89	0.92	0.51	0.33	0.30	21.34
1.0 - 1.5	0.05	0.04	0.04	0.06	0.11	0.26	0.44	0.41	0.20	0.09	0.06	0.07	7.58
1.5 - 2.0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	3.33
2.0 - 2.5	0.21						0.01		0.01				2.22
2.5 - 3.0		0.21	0.21	0.25	0.47	0.73							2.31
3.0 - 3.5							0.89	0.64	0.33	0.25	0.16		2.41
3.5 - 4.0												0.16	0.22
4.0 - 4.5													0.02
H <sub>s</sub> [mt]	2.02	2.07	1.92	2.38	3.55	5.25	7.30	6.95	4.05	2.58	1.92	1.77	100.0

Tabella 21 - clima h<sub>s</sub> – dir dalla piattaforma azalea dal '93 al '02

Dalle tabelle precedenti si evidenzia che il settore prevalente è quello di Bora. Le onde più frequenti sono quelle tra 0,25 e 1,00 mt, con una frequenza relativa pari al 60,3% ed in particolar modo quelle provenienti da Maestrale hanno una frequenza pari al 18,4%. Le onde comprese tra tale intervallo di altezze d'onda e provenienti da Maestrale hanno una frequenza pari in totale a 10,5%. Si vede comunque il parziale effetto di schermatura da parte del promontorio del S.Bartolo sulla boa posta a largo di Rimini per le onde provenienti da Scirocco.

Va detto inoltre che le matrici possono essere rappresentate anche graficamente mediante curve di livello che uniscono coppie di centro classe (cioè il valor medio delle classi di  $H_s$ ,  $DIR$  e  $T_s$ ) con diversi livelli di frequenza (ad esempio, nel nostro caso, lo 0,01%, 0,1%, 1% e 10%). Qui di seguito, ad assi invertiti rispetto alle tabelle sopra elencate, vengono rappresentate le matrici con intervalli più ampi che mostrano come le frequenze relative di accadimento siano concentrate attorno a ben definite coppie di valori.

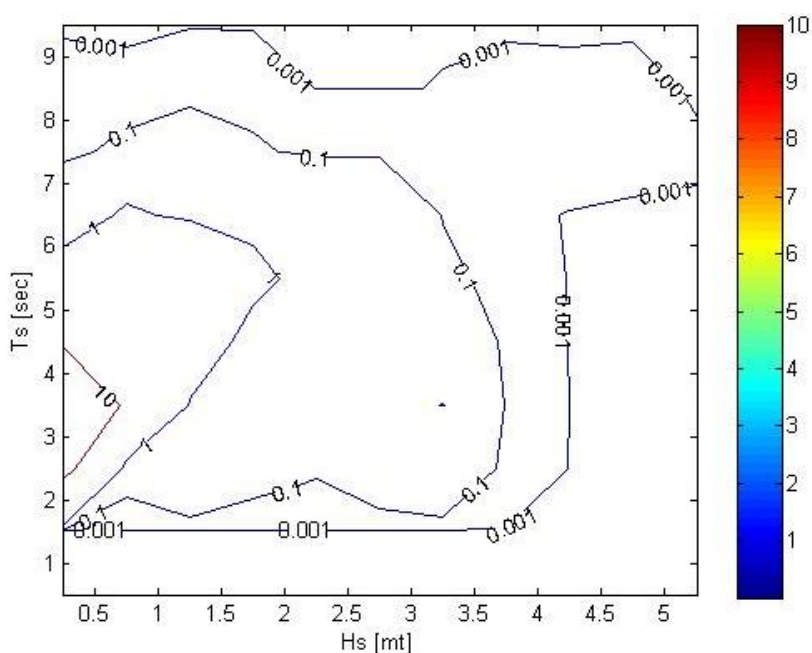
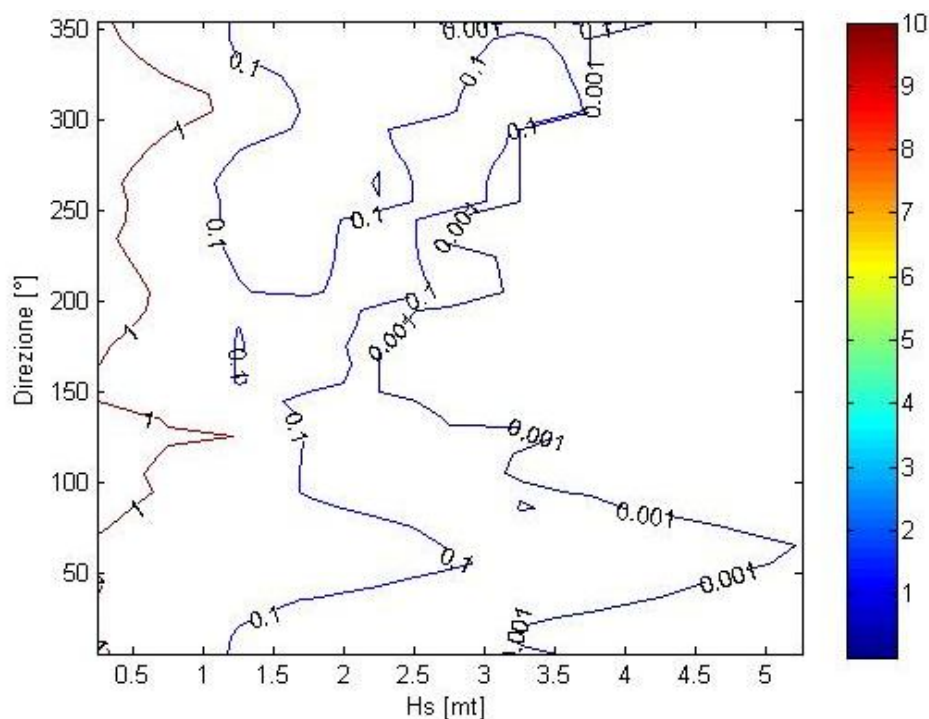


Figura 3.14-Rappresentazione grafica della matrice  $H_s - T_s$





*Figura 3.15-Rappresentazione grafica della matrice  $H_s$  - DIR*

Dalle immagini sopra riportate si vede come le matrici abbiano termini non nulli raggruppati attorno a valori ben definiti: ad esempio per il periodo significativo si hanno onde di 0,5 – 0,7 mt con periodi di 3 – 4 secondi, per il livello si hanno onde da 0 a 1,0 mt poste a medio mare (-0.1 – 0.1 mt) e per la direzione si hanno sempre concentrazioni attorno a onde abbastanza basse (0 – 0.5 mt) per settori da Bora e da Scirocco.

Le tabelle mostrate fin'ora, riportano dati relativi alla boa Azalea posta in mare aperto e pertanto sono considerate le altezze d'onda relative a tutte le direzioni a 360° ed un notevole numero di onde.

Se tali dati devono essere utilizzati a riva, relativamente al paraggio di Misano Adriatico, dovranno di conseguenza essere modificati.

Prima di tutto occorrerà eliminare tutte le direzioni delle onde provenienti dai settori compresi tra i 120° e i 330°, ora occupati dalla costa. Saranno pertanto considerate le direzioni:

- da 0° a 120°;
- da 330° a 360°.

Successivamente, occorre ridurre sensibilmente il numero delle onde per poter eseguire agevolmente una stima del trasporto solido lungo riva, mantenendo però invariata l'energia totale del clima.

Si procede, in sostanza a buon senso e a tentativo, accorpendo le classi adiacenti, là dove la frequenza è modesta, e determinando i valori medi pesati sulla frequenza di  $H_s$ ,  $Dir$  e  $T_p$ .

Prima di tutto si riporta la tabella contenente le semplificazioni iniziali:

- direzioni da  $0^\circ$  a  $120^\circ$  e da  $330^\circ$  a  $360^\circ$ ;
- altezze d'onda da 0.00 m a 3.00 m.

DIR [°]	0°-10°	10°-20°	20°-30°	30°-40°	40°-50°	50°-60°	60°-70°	70°-80°
0.0 - 0.5	1,18	0,97	0,97	0,99	1,07	0,85	0,91	1,06
0.5 - 1.0	0,29	0,25	0,23	0,27	0,29	0,63	0,70	0,72
1.0 - 1.5	0,07	0,08	0,12	0,13	0,23	0,32	0,36	0,28
1.5 - 2.0	0,03	0,04	0,05	0,10	0,18	0,27	0,27	0,23
2.0 - 2.5	0,01	0,01	0,03	0,07	0,12	0,19	0,19	0,15
2.5 - 3.0	0,00	0,00	0,02	0,04	0,06	0,12	0,09	0,05
3.0 - 3.5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,04	0,01

DIR [°]	80°-90°	90°-100°	100°-110°	110°-120°	330°-340°	340°-350°	350°-360°
0.0 - 0.5	1,23	1,41	1,82	2,33	1,70	1,34	1,20
0.5 - 1.0	0,74	0,90	0,60	0,83	0,51	0,33	0,30
1.0 - 1.5	0,30	0,25	0,50	0,61	0,09	0,06	0,07
1.5 - 2.0	0,14	0,08	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03
2.0 - 2.5	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
2.5 - 3.0	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.0 - 3.5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,16	0,00

Successivamente di riporta la tabella ulteriormente semplificata, nella quale in azzurro sono evidenziate le direzioni e in giallo le altezze d'onda. Si ricorda che tale tabella è stata ottenuta accorpendo le classi adiacenti, là dove la frequenza è modesta e determinando i valori medi pesati sulla frequenza di  $H_s$ ,  $Dir$  e  $T_p$ .

Si ottiene così una notevole riduzione del numero delle onde passando da 400 onde del clima di partenza a 16 onde del clima rappresentativo semplificato.

	37,80	66,04	106,65	348,44
0,25	4,11	5,12	5,56	4,23
	23,53	86,15	338,95	
0,75	1,63	5,11	0,85	
	8,43	65,77	107,63	
1,25	0,62	1,50	1,35	
	3,92	61,37	102,51	
1,75	0,19	1,18	0,16	
		60,44		
2,25		0,77		
		56,25		
2,75		0,36		
		55,48		338,88
3,25		0,12		0,40

La stessa cosa viene fatta per le coppie  $H_s - T_s$ . Si riporta la prima tabella semplificata:

$T_s$ [sec]	2 - 4	4 - 6	6 - 9
0.0 - 0.5	50,5607	9,29708	0,38771
0.5 - 1.0	6,98524	13,3904	1,31446
1.0 - 1.5	1,32671	5,18939	1,12853
1.5 - 2.0	0,83739	1,85062	0,65795
2.0 - 2.5	0,78695	0,57003	0,87343
2.5 - 3.0	1,12277	0,63489	0,48283
3.0 - 3.5	1,46724	0,70624	0,18521

Successivamente si riporta la tabella contenente i periodi associati alle altezze d'onda ed anche la ripidità delle onde calcolata come:

$$H_s / L$$

con:

$$L = 1,56 T_s^2$$

$H_s$	$T_p$	$L$	Ripidità
0,25	3	14,04	0,01781
0,75	4	24,96	0,03005
1,25	5	39,00	0,03205
1,75	5,5	47,19	0,03708
2,25	6,5	65,91	0,03414
2,75	7	76,44	0,03598
3,25	7,5	87,75	0,03704

Una volta apportate le semplificazioni relativamente il clima rappresentativo, è opportuno confrontare l'energia ondosa totale nei due casi:

- clima non semplificato;
- clima semplificato;

e accertarsi che questa resti invariata.

L'energia ondosa è calcolata come:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

**Energia ondosa del clima non semplificato: 35725,57**

DIR[°]	0°-10°	10°-20°	20°-30°	30°-40°	40°-50°	50°-60°	60°-70°	70°-80°
0,25	90,37	74,51	73,96	75,60	81,98	64,92	69,71	80,83
0,75	201,61	173,16	155,50	188,37	196,71	432,17	479,75	497,41
1,25	125,36	159,43	222,11	239,82	438,76	609,09	690,85	543,69
1,75	130,87	133,54	173,60	365,89	686,38	1017,55	1001,53	857,31
2,25	61,81	75,05	207,50	406,17	715,21	1196,44	1178,78	913,88
2,75	39,57	39,57	171,47	349,54	580,37	1127,76	824,39	435,28
3,25	27,63	0,00	27,63	101,32	386,88	700,06	460,57	193,44

DIR[°]	80°-90°	90°-100°	100°-110°	110°-120°	330°-340°	340°-350°	350°-360°
0,25	94,40	108,03	139,10	178,34	129,99	102,41	91,68
0,75	511,15	619,07	414,02	570,50	352,70	230,56	204,56
1,25	581,84	478,28	955,20	1159,59	181,23	121,27	132,17
1,75	510,11	301,79	160,24	149,56	101,49	74,78	104,16
2,25	375,27	216,33	97,13	75,05	26,49	26,49	30,90
2,75	158,28	59,36	19,79	32,98	19,79	26,38	0,00
3,25	9,21	18,42	9,21	9,21	3177,91	2017,28	9,21

**Energia ondosa del clima semplificato: 35725,57**

	<b>37,80</b>	<b>66,04</b>	<b>106,65</b>	<b>348,44</b>
<b>0,25</b>	314,44	391,836	425,465	324,086
	<b>23,53</b>	<b>86,15</b>	<b>338,95</b>	
<b>0,75</b>	1119,91	3524,07	583,26	
	<b>8,43</b>	<b>65,77</b>	<b>107,63</b>	
<b>1,25</b>	1181,39	2864,23	2593,07	
	<b>3,92</b>	<b>61,37</b>	<b>102,51</b>	
<b>1,75</b>	718,43	4438,77	611,60	
	<b>12,63</b>	<b>60,44</b>	<b>101,36</b>	
<b>2,25</b>	428,25	4785,75	388,51	
	<b>14,11</b>	<b>56,25</b>	<b>92,32</b>	
<b>2,75</b>	296,78	3317,33	270,40	
	<b>26,11</b>	<b>55,48</b>	<b>79,62</b>	<b>338,88</b>
<b>3,25</b>	165,80	1547,50	239,49	5195,19

### 3.3.4 Calcolo del Trasporto Solido

Una volta elaborati i dati relativi al clima meteo marino del paraggio, si può procedere con il calcolo del trasporto solido del materiale a riva.

L'obiettivo è quello di quantificare il trasporto solido della spiaggia di Misano Adriatico nei due casi:

- sabbia con diametro 0,2 mm (caso di ripascimento attuale);
- sabbia con diametro 0,6 mm (caso di ripascimento con le sabbie del Po).

Si vuole capire di quanto si modifica il trasporto solido in presenza di materiale più grossolano.

Per il calcolo del trasporto solido, sono presenti numerosi modelli matematici. Trattando dei modelli matematici per lo studio dell'evoluzione del litorale, è appena il caso di ricordare che il fenomeno del trasporto del sedimento è di tipo tridimensionale e pertanto andrebbe rappresentato da un modello completamente tridimensionale. Tali modelli sono però attualmente ad un livello iniziale per le pratiche applicazioni. Occorre

quindi rifarsi a modelli bidimensionali o quasi tridimensionali per trovare reali mezzi di lavoro. In ogni caso, va posta attenzione ai numerosi meccanismi del fenomeno.

Da ricordare inoltre, i modelli a N/linee, dove il modello a una linea vuole rappresentare l'evoluzione del litorale schematizzato con una semplice linea e il modello a due linee l'evoluzione del litorale schematizzato da una superficie piana.

Nel caso in esame, il trasporto solido è valutato con un modello a una linea, apportando però le seguenti semplificative:

- si ipotizza un versamento a riva fino alla profondità di chiusura;
- non si considera la presenza di opere.

Infatti una soluzione del tipo a una linea risulterebbe del tutto inadeguata qualora il trasporto lungo riva della sabbia sia anche solo parzialmente interrotto da una qualsiasi struttura o da una configurazione del litorale che si discosti fortemente dalla linea.

Premesso ciò, si procede con il calcolo del trasporto solido con la formula di **Kamphuis**:

$$\frac{I_{ls}}{\rho g H_{sb}^3 / T_p} = 1,3 \times 10^{-3} \left( \frac{H_{sb}}{L_{op}} \right)^{-1,25} \frac{H_{sb}}{D_{n50}} (\tan \alpha)^{0,75} \sin 2\beta^{0,6}$$

questa formula dipende:

- dal clima rappresentativo;
- dalla pendenza della zona dei frangenti;
- dalla perpendicolare a riva;
- dal diametro del sedime e quindi dal parametro A del profilo.

Questa formula viene implementata in un foglio Excell al fine di procedere, con un modello matematico a una linea, al calcolo della portata di sedimenti per unità di lunghezza, Q:

$$Q_{ls} = \frac{I_{ls}}{(\rho_s - \rho_w) g (1 - n)}$$

Si calcola quindi il trasporto solido longshore nei due casi:

- Caso 1: sabbia di 0,2 mm, relativa all'attuale condizione sulla spiaggia di Misano Adriatico;
- Caso 2: sabbia di 0,6 mm, relativa allo studio di fattibilità di intervento con le sabbie del Po.



### **Caso 1: sabbia di 0,2 mm:**

I dati necessari da inserire in Excell sono:

- $\rho_s = 2650 \text{ Kg/mc}$ ,  $\rho_w = 1025 \text{ Kg/mc}$  ;
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ;
- porosità  $n = 0,4$ ;
- D50 relativo alla condizione attuale, 0,2 mm;
- perpendicolare a riva, che a Misano è inclinata di  $30^\circ$  rispetto al Nord;
- indice di frangimento  $\gamma_b = H/h = 0,6$ ; con  $h$  = altezza d'onda al frangimento;
- pendenza della surf zone  $\alpha = 0,10$ ;
- parametro  $A = 2,25 \left(\frac{w^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,2$  ; con  $w$  = velocità di caduta = 0,08 m/s.

A partire da questi dati, si calcola per ognuna delle 16 onde, diverse per altezza (m), periodo e direzione, il volume trasportato in un anno lungo riva. Il processo è di tipo iterativo.

Freq. %	Hs	Tp	Direz	lls	Qls		V
7,00	0,25	3,00	37,80	6,52198	0,00068	1505,26	1505,26
14,00	0,25	3,00	66,04	3,54235	0,00037	-1635,1	1635,13
15,00	0,25	3,00	106,65	6,41913	0,00067	-3174,7	3174,68
7,00	0,25	3,00	348,44	2,86624	0,0003	661,521	661,521
2,00	0,75	4,00	23,53	197,785	0,02068	13042,4	13042,4
7,00	0,75	4,00	86,15	192,376	0,02011	-44400	44399,9
3,00	0,75	4,00	338,95	35,2518	0,00369	3486,87	3486,87
1,00	1,25	5,00	8,43	1023,99	0,10706	33762	33762
2,00	1,25	5,00	65,77	544,76	0,05695	-35923	35922,6
2,00	1,25	5,00	107,63	1016,83	0,10631	-67052	67052,2
0,20	1,75	5,50	3,92	2451,98	0,25636	16168,9	16168,9
1,50	1,75	5,50	61,37	657,247	0,06872	-32505	32505,2
0,20	1,75	5,50	102,51	2988,45	0,31244	-19706	19706,5
1,00	2,25	6,50	60,44	879,668	0,09197	-29004	29003,6
0,40	2,75	7,00	56,25	5960,01	0,62312	78603,1	78603,1
0,10	3,25	7,50	55,48	11530,9	1,20556	38018,5	38018,5

Per convenzione si considera:

- positivo, il trasporto da Nord a Sud;
- negativo, il trasporto da Sud a Nord.

Nel complesso si ottiene un trasporto pari a **-48151 mc/anno**, cioè diretto da Sud verso Nord, coerentemente con quanto visto nel Capitolo 1, in cui è mostrato come in tal zona sia questa la direzione prevalente del trasporto solido.

Questo valore è stato ottenuto andando a modificare i pesi relativi alle frequenze di accadimento per le singole onde e rispecchia il volume di materiale perso all'interno della cella protetta, di circa 40000 mc/anno, determinato in base ai dati storici visti nel precedente paragrafo. Date le incertezze di queste stime, non è bene progettare l'intervento di ripascimento con un volume inferiore a quello che valutiamo si perda nella cella protetta sulla base dei dati storici (ripascimento di 100'000 mc/ ogni 3 anni). Il motivo per cui è meglio attenersi ai dati storici, deriva dalle limitazioni insorte con l'utilizzo di un modello numerico ad una linea:

- si considera che la spiaggia sia già in condizioni di equilibrio, cosa non vera nel periodo successivo al ripascimento;
- si considera solamente il trasporto longshore;
- non si considera la presenza di opere, in realtà molto massiccia a Misano;
- si utilizzano formule che non considerano la distribuzione spaziale e verticale del sedimento.

Questi limiti sono in parte superati grazie appunto alla calibrazione dei pesi relativi alle frequenze delle singole onde.

Una volta determinati tali pesi e valutato il trasporto solido, assolutamente coerente con i dati storici, si esegue lo stesso procedimento nel caso di sabbia con granulometria maggiore: la sabbia del Po.

### **Caso 2: sabbia di 0,6 mm**

Il modello e i dati adottati sono i medesimi, ad eccezione del valore del D50 che è variato da 0,2 mm a 0,6 mm.

Freq. %	Hs	Tp	Direz	Ils	Qls		V
7,00	0,25	3,00	37,80	2,173995	0,0002273	501,7525	501,7525
14,00	0,25	3,00	66,04	1,180783	0,0001235	-545,044	545,0435
15,00	0,25	3,00	106,65	2,139711	0,0002237	-1058,23	1058,228
7,00	0,25	3,00	348,44	0,955413	9,989E-05	-220,507	220,5068
2,00	0,75	4,00	23,53	65,92848	0,0068929	4347,465	4347,465
7,00	0,75	4,00	86,15	64,12539	0,0067043	-14800	14799,98
3,00	0,75	4,00	338,95	11,7506	0,0012285	-1162,29	1162,29
1,00	1,25	5,00	8,43	341,33	0,0356862	11254,01	11254,01
2,00	1,25	5,00	65,77	181,5866	0,018985	-11974,2	11974,21
2,00	1,25	5,00	107,63	338,9446	0,0354369	-22350,7	22350,73
0,20	1,75	5,50	3,92	817,3257	0,0854519	5389,62	5389,62
1,50	1,75	5,50	61,37	219,0823	0,0229052	-10835,1	10835,07
0,20	1,75	5,50	102,51	996,1505	0,1041481	-6568,83	6568,829
1,00	2,25	6,50	60,44	293,2227	0,0306566	-9667,87	9667,865
0,40	2,75	7,00	56,25	1986,669	0,2077073	26201,03	26201,03
0,10	3,25	7,50	55,48	3843,625	0,4018532	12672,84	12672,84

In questo caso il valore del trasporto solido è di **-18816 mc/anno**, sempre diretto da Sud verso Nord.

Se confrontiamo i due valori, relativamente ai due casi:

- **caso 1:** sabbia 0,2 mm; trasporto solido: **-48151 mc/anno**;
- **caso 2:** sabbia 0,6 mm; trasporto solido: **-18816 mc/anno**;

si osserva come nel secondo caso il trasporto si sia ridotto di un fattore 2-3.

Se si tiene però conto del fatto che non è simulato un vero e proprio ripascimento, essendo la spiaggia già in equilibrio, è opportuno considerare una differenza di erosione con fattore 2.

In ogni caso, l'utilizzo di una sabbia con granulometria 0,6 mm è cautelativa.

In conclusione si può affermare che:

- caso 1: ripascimento 100.0000 mc ogni 2 anni;
- caso 2: ripascimento 100.000 mc ogni 5 anni.

Attenendosi ai dati storici si va pertanto ad operare su una riduzione dei versamenti in frequenza, piuttosto che in volume.

Questa considerazione è peraltro perfettamente compatibile con le estrazioni dal fiume Po. Infatti a causa degli elevati costi delle operazioni di dragaggio e trasporto di materiale dal Po e della disponibilità di materiale accumulato dietro lo sbarramento, è opportuno prelevare ingenti quantitativi di materiale con frequenze di estrazione superiori ai 3 anni.

E' inoltre buona norma prevedere 2 monitoraggi:

- il primo al termine del primo anno;
- il secondo al termine del terzo anno;

per valutare se al termine del terzo anno si verificano o meno condizioni per cui va eseguito un ulteriore versamento.

## CAPITOLO QUARTO

*Ipotesi di Trasporto di Sabbia da Isola Serafini a Misano*

*Adriatico*

## 4.1 Introduzione

Fin'ora sono state effettuate considerazioni sulla granulometria della sabbia presente a Isola Serafini compatibile con la spiaggia di Misano Adriatico e un suo possibile riutilizzo per ovviare al problema della fonte di sabbia.

Tramite un semplice modello matematico, è stato possibile prevedere l'entità del trasporto solido lungo riva nel caso di versamenti con sabbia di granulometria 0,6 mm. Tale valore è passato da **-48151 mc/anno**, per il caso di sabbia di 0,2 mm, a **-18816 mc/anno**, per il caso di sabbia di 0,6 mm. In questo modo si è potuta stimare l'entità del ripascimento che nel caso di utilizzo di sabbia prelevata da Isola Serafini è all'incirca di 100.000 mc ogni 5 anni.

In questo capitolo saranno fornite informazioni relative alla navigazione sul fiume Po e alla necessità di dragaggi per mantenere i fondali idonei allo svolgimento di quest'ultima.

Relativamente alle sabbie dragate, si farà un breve accenno alla tecnica del soil-washing che è un processo di trattamento che rimuove parte dei contaminanti dalla frazione grossolana e li concentra nei fanghi più fini. Al fine di riutilizzare il fango dragato per la realizzazione di opere di interesse pubblico, come il ripascimento delle spiagge, è importante che il materiale rientri nella classe A. A tale scopo deve da un lato essere costituito prevalentemente da materiale sabbioso, dall'altro avere un ridotto carico contaminante.

Infine saranno valutate le ipotesi di trasporto del materiale.

Si farà riferimento a due possibilità:

- trasporto fluvio – marittimo;
- trasporto su gomma.

In entrambi i casi si individueranno i mezzi disponibili al trasporto di sabbia, i costi, relativi al carico e alla lunghezza del percorso e i tracciati possibili.

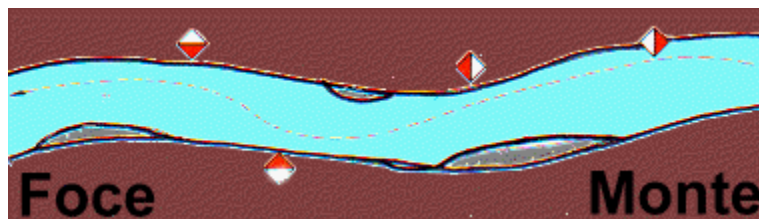












## 4.2 La navigazione sul fiume Po

I paesi dell'Unione Europea, che hanno sviluppato più dell'Italia la navigazione fluviale, sono partiti da un assunto di base molto semplice: *“tutte le merci che possono spostarsi sull'acqua, devono navigare sull'acqua, tutte le merci che non possono spostarsi sull'acqua devono spostarsi sulla ferrovia, tutte le altre merci possono muoversi su gomma”*.

Le evoluzioni recenti del trasporto per acque interne, nel nostro Paese, mostrano una tendenza alla crescita per alcune tipologie di merci, anche se con peso e percentuali diverse rispetto alle maggiori idrovie europee. E' innegabile che le vie navigabili giocano un ruolo maggiore nelle Regioni che attraversano e che possono servire direttamente. Dati del 2005 rilevano un trasporto fluviale al 3% in Francia, 12% in Belgio, 15% in Germania e 43% in Olanda. La rete italiana, concentrata al nord, offre condizioni geografiche limitate, che solo in parte possono essere superate dal collegamento con il corridoio proposto dal mare Adriatico. Inoltre le caratteristiche tecniche della stessa rete sono ancora eterogenee con prevalenza per la navigazione di navi di 3° e 4° classe. Diversamente da quanto dovrebbe essere, il trasporto fluviale in Italia soffre di competitività economica, dovuta anche dal fatto che i viaggi delle navi o convogli hanno un percorso, in salita o discesa, sempre a vuoto che incide sui costi. In Francia il costo del trasporto varia in funzione delle dimensioni delle navi. In media è di 2,5 centesimi di euro per t-km per i piccoli convogli e di 2 c€/t-km per le classi più grandi. Nel nostro sistema idroviario i costi sono di circa 4/4,5 c€/t-km.

In Italia, la navigazione commerciale è possibile nel Po da Piacenza al mare, per un percorso di 382 km, a natanti fino a 1.000 tonnellate: in questo tratto sono presenti le segnalazioni (*figura 4.1*), che indicano quando occorre cambiare sponda per non uscire dalla zona dove il fondale è abbastanza fondo per il passaggio.



	Segnale di chiamata: dirigersi verso la sponda		Segnale di rimando: abbandonare la sponda
	Segnale di chiamata a rimando: dirigersi verso la sponda e abbandonare la sponda		Segnale di prosecuzione: proseguire lungo la sponda
	Bianca - situata a 20m a sinistra della linea di rotta per chi scende verso valle		Rossa - situata a 20m a destra della linea di rotta per chi scende verso valle
	Boe bianche posta a sinistra della linea di rotta 50m a valle e 50m a monte dei ponti		Boe rosse posta a destra della linea di rotta 50m a valle e 50m a monte dei ponti
	Il segnale rosso viene posto sulla portiera d'apertura di ponti in barche		Tabelloni bianchi con pittura fluorescente per la visibilità notturna

*Figura 4.1-Segnaletica Fluviale*

La navigazione turistica con piccole imbarcazioni è possibile su quasi tutto il fiume, tranne l'alto corso, e sui tratti finale di molti affluenti.

Un sistema idroviario è importante perché il trasporto delle merci per via d'acqua, anche se più lento, è più conveniente di quello per strada o per ferrovia, specialmente per il trasporto di grandi quantitativi.

Ogni anno sul Po si trasportano un milione di tonnellate di merci. Con 500 km oggi navigabili se ne potrebbero trasportare 16 milioni.

<p><b>Una chiatta di modeste dimensioni può trasportare:</b></p> <p><b>1</b>  <b>=</b> <b>80</b>  <b>=</b> <b>88</b> </p> <p>1 convoglio di 2 chiatte lungo 100m è uguale a un convoglio di 80 carri ferroviari lunghi 1 km ed a una colonna di 88 camion lunga 2.8 km</p> <p><b>L'idrovia sul Po potrebbe togliere dalla Milano/Venezia oltre 5.000 TIR al giorno</b></p>
---

Si è dunque capito che in Italia, le vie d'acqua interne, svolgono un ruolo molto limitato, se raffrontato con le loro potenzialità. La ripartizione modale del traffico in Italia indica:







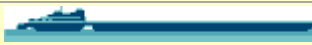
- 86,3% dei trasporti su strada;
- 9,1% dei trasporti su ferrovia;
- 0,1% dei trasporti vie navigabili.

Va ricordato però che in seguito alla legge 20/11/90 n°380, il sistema idrovia rio padano-vento è entrato a pieno titolo negli strumenti programmatici nazionali ed inserito dal 1996 dalla comunità Europea nella rete trans-europea delle vie navigabili per il trasporto combinato. Tale legge ha come obiettivo quello di traslare una quota di traffico, oggi gravitante su strada, nell'idrovia, creando una serie di collegamenti interni in cui possono agevolmente transitare navi della V classe europea, da 2000 tonnellate di portata. La realizzazione di un sistema idrovia rio nazionale, si rivela uno strumento poco costoso, in rapporto alle altre modalità di trasporto, rispettoso dell'ambiente, caratterizzato da un debole impatto sul territorio in termini di inquinamento da propulsione e bisognoso di minore energia per tonnellata trasportata (vedi tabella 1). E' inoltre un sistema più sicuro sia per le persone che per le cose.

	<b>Costi Kg spostati da un cavallo vapore</b>	<b>Risparmio energetico con 5 kg di carburante si percorrono</b>
	<b>4.000</b>	<b>500</b>
	<b>500</b>	<b>333</b>
	<b>150</b>	<b>100</b>

*Tabella 1-Risparmio energetico con trasporto fluviale*

Per quanto riguarda le imbarcazioni attualmente in uso sul Po, sono le seguenti:

<b>Le imbarcazioni fluviali</b>	 Pontone fluviale
 Spintore fluviale	 Chiatta componibile
 Draga fluviale	 Motobarca per trasporto carichi
 Moto-pontone	 Convoglio spinto padano

Va inoltre ricordato che affinché un corso d'acqua possa essere considerato navigabile, deve poter disporre dei tiranti idrici sufficienti.

Il Po è un fiume che ha straordinarie caratteristiche naturali di navigabilità, che gli derivano dalla:

- *pendenza*: è molto contenuta; non supera i 16 cm al km;
- *ampiezza dell'alveo*: essendo costituito da sabbie di facile rimozione è facilmente ampliabile;
- *portata d'acqua*: anche in periodi di magra, è consistente e la profondità minima è dell'ordine di 3-4 m lungo tutto il percorso. L'esistenza di bassi fondali, che impedirebbero la regolare navigabilità, può essere facilmente monitorata ed eliminata con opere di modesta entità.

Per completezza si riportano le statistiche sulla navigabilità effettuate dall'AIPO: Agenzia Interregionale per il fiume Po:

Tabella permanenza dei fondali nella tratta da: Cremona (km 367,5) - Volta Grimana (km 612)								
Valori Annuali								
ANNO	h >= 140cm x gg	h >= 160cm x gg	h >= 180cm x gg	h >= 200cm x gg	h >= 220cm x gg	h >= 240cm x gg	h >= 250cm x gg	h >= 280cm x gg
1988	351	339	317	260	179	155	173	105
1989	356	307	225	184	133	88	73	55
1990	266	227	181	115	79	57	52	34
1991	325	289	265	212	167	127	106	80
1992	347	324	282	208	178	151	143	106
1993	352	336	300	226	187	140	119	82
1994	355	338	324	298	254	195	171	102
1995	353	348	330	292	237	181	157	100
1996	358	355	340	320	298	256	227	147
1997	329	317	269	210	169	98	85	56
1998	342	330	308	243	180	127	116	77
1999	353	335	294	266	230	194	171	112
2000	338	328	289	242	167	135	127	108
2001	365	363	348	331	281	222	185	119
2002	348	316	284	250	190	151	133	97
2003	306	279	194	93	61	46	39	28
2004	334	323	307	268	198	152	141	115
2005	291	277	247	172	82	55	47	24
2006	270	212	164	113	71	51	40	26
2007	278	222	139	71	52	40	33	26
2008	312	265	213	181	148	119	112	96
2009	338	298	212	155	121	92	81	60
2010	343	321	281	252	200	164	134	104

Tabella permanenza dei fondali nella tratta da: Cremona (km 367,5) - Foce Mincio (km 486)								
Valori Annuali								
ANNO	h >= 140cm x gg	h >= 160cm x gg	h >= 180cm x gg	h >= 200cm x gg	h >= 220cm x gg	h >= 240cm x gg	h >= 250cm x gg	h >= 280cm x gg
1988	355	343	328	280	207	182	175	142
1989	357	308	228	190	145	110	91	72
1990	273	235	191	130	93	72	63	45
1991	340	279	270	230	192	155	131	100
1992	350	330	295	260	202	188	177	140
1993	356	341	328	313	261	217	194	149
1994	358	345	337	327	314	276	260	212
1995	353	348	337	310	282	233	214	171
1996	358	355	344	329	316	301	283	220
1997	332	320	290	229	202	174	152	91
1998	343	331	320	264	192	147	133	102
1999	357	343	317	286	257	223	215	161
2000	346	340	323	302	241	190	175	144
2001	365	363	352	340	317	294	268	187
2002	350	326	307	285	258	227	220	175
2003	315	283	231	168	118	86	68	36
2004	346	339	321	306	249	185	171	140
2005	300	292	272	214	122	80	72	46
2006	284	248	209	173	119	85	74	50
2007	288	268	196	107	72	54	51	38
2008	346	318	273	228	192	161	155	131
2009	365	362	349	331	297	258	248	205
2010	365	357	344	334	326	290	273	217

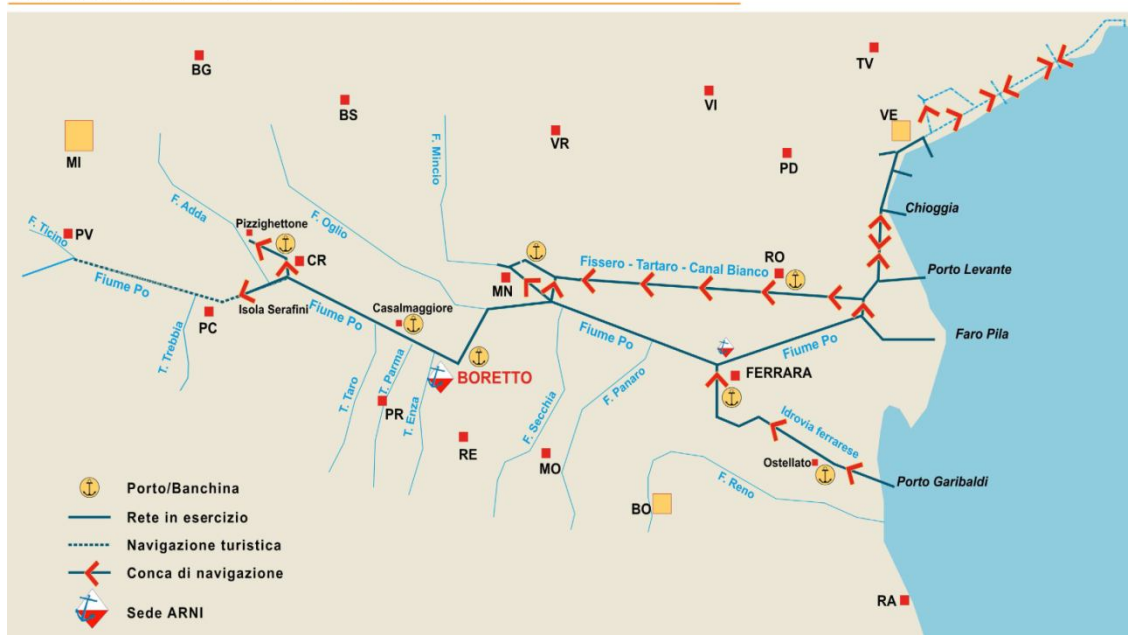
## 4.2.1 Il sistema idroviario Padano Veneto

La rete idroviaria Padano-Veneta definita dal decreto del Ministero dei Trasporti e della Navigazione n.759 del 25/06/92, previsto dalla legge 380/90, ha un'estensione di 812 km e comprende le seguenti idrovie:

- fiume Ticino da Pavia alla confluenza con il Po: 7 km turistico;
- fiume Po da foce Ticino a Cremona: 97 km turistico;
- fiume Po, da Cremona al mare: 292 km;
- primo tratto del canale MI-CR-Po /fermo a Pizzighettone): 14 km;
- fiume Mincio, da Mantova al Po (via Governolo): 21 km;
- Fissero-Taratro-Canalbianco-Po di Levante (incile): 117 km;
- Po di Levante: 18 km;
- idrovia Ferrarese (Pontelagoscuro-Portograribaldi): 70 km;
- Canale Po-Brondolo (Chioggia): 19 km;

- laguna Veneta (da Chioggia a Venezia): 30 km;
- Litoranea Veneta (Venezia-Foce Isonzo): 127 km turistico.

#### Sistema Idroviario Padano - Veneto - rete in esercizio



I porti interni sono: Cremona, Mantova, Milano, Pavia, Casalmaggiore, Pizzighettone, Ostiglia, Rovigo, Legnano, Padova, Pontelagoscuro, Boretto, Porto Levante, Piacenza.

Gli sbocchi a mare della rete in esercizio sono sostanzialmente tre:

- a sud Portogaribaldi al termine dell'idrovia ferrarese;
- a nord Porto Levante;
- Chioggia e Venezia nella laguna Veneta.

Le criticità del sistema idroviario:

- Per quanto riguarda il tipo di imbarcazioni qui presenti, si riporta la classificazione ufficiale europea, stilata dalla CEMT (Commissione Europea Ministeri dei Trasporti), diventata legge in Italia nel 2000, che fornisce le caratteristiche delle motonavi e delle chiatte che possono qui navigare in base al tirante idrico:
  - o motonavi e chiatte: lunghezza massima da 95 a 110 m; larghezza massima 11,4 m; tirante idrico 2,5 m; tonnellaggio da 1500 a 3000 ton;
  - o convogliata a spinta: lunghezza massima da 95 a 110 m; larghezza massima 11,4 m; tirante idrico da 2,5 a 4,5 m; tonnellaggio da 1600 a 3000 ton.

- I porti interni sono ancora pochi così come i collegamenti con il territorio;
- Le relazioni di traffico sono prevalentemente legate alle poche industrie e insediamenti collocati a ridosso delle vie d'acqua ed agli impianti industriali per la lavorazione degli inerti collocati sul Po;
- La gestione della rete navigabile e la manutenzione dei fondali del Po non sono ancora a livelli ottimali;
- Gli sbocchi a mare non sono ancora adeguati.

Per quanto riguarda le tipologie di merci che oggi sono trasportate sulla rete idroviaria, queste sono:

- oli combustibili per le centrali termoelettriche situate sul Po;
- prodotti chimici per le industrie dell'area Mantovana;
- gas;
- materiali ferrosi;
- parti di impianti;
- sfarinati/cereali per i porti di Mantova e Rovigo;
- inerti, che del 100% dei prodotti che viaggiano sul Po, sono circa il 70%.

La nostra attenzione si focalizza soprattutto su quest'ultimo punto: il traffico interno di inerti, prelevati direttamente dal fondo del fiume.

#### **4.2.2 Dragaggi per la manutenzione dei fondali navigabili e trattamento delle sabbie con il metodo del Soil Washing**

Il dragaggio è l'operazione di scavo eseguita da un'imbarcazione (battello-draga), tramite le draghe (macchine scavatrici), per asportare sabbia, ghiaia e detriti dal fondo, sia in acque marine che fluviali, per poi utilizzarle altrove. I corsi d'acqua, in questo caso il Po, necessitano di operazioni di questo tipo per mantenere attiva la navigazione soprattutto nei periodi dell'anno caratterizzati da scarsi tiranti idrici. Il materiale dragato può poi, una volta trattato, essere utilizzato per altri scopi:

- uso edile;
- ripacimenti di spiagge.

Per poter essere riutilizzato in opere di interesse pubblico, come il ripascimento delle spiagge, è importante che il materiale dragato rientri nella classe A. A tale scopo deve da un lato essere costituito prevalentemente da materiale sabbioso, dall'altro avere un ridotto carico contaminante, come riportato in tabella 2.



Classe	Opzioni di gestione
<b>A1</b>	<p>Sabbie ( pelite &lt;10% ) da utilizzare o ricollocare secondo la seguente priorità:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ripascimento di arenili ( previa verifica di compatibilità con il sito di destinazione );</li> <li>2. Ricostruzione di strutture naturali in ambito marino costiero comprese le deposizioni finalizzate al ripristino della spiaggia sommersa;</li> <li>3. Riempimenti di banchine e terrapieni in ambito portuale;</li> <li>4. Riutilizzi a terra ( secondo la normativa vigente );</li> <li>5. Deposizione in bacini di contenimento ( es. vasche di colmata );</li> <li>6. Immersione in mare.</li> </ol>
<b>A2</b>	<p>Materiale da utilizzare o ricollocare secondo la seguente priorità:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ricostruzione di strutture naturali in ambito marino costiero compresa la deposizione finalizzata al ripristino della spiaggia sommersa ( solo nel caso di prevalente composizione sabbiosa );</li> <li>2. Riempimenti di banchine e terrapieni in ambito portuale;</li> <li>3. Riutilizzi a terra ( secondo la normativa vigente );</li> <li>4. Deposizione in bacini di contenimento ( es. vasche di colmata );</li> <li>5. Immersione in mare.</li> </ol>
<b>B1</b>	<p>Materiale da utilizzare o ricollocare secondo la seguente priorità:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Riutilizzi a terra ( secondo la normativa vigente );</li> <li>2. Deposizione in bacini di contenimento che assicurino il trattenimento di tutte le frazioni granulometriche del sedimento ( incluso il riempimento di banchine ).</li> </ol>
<b>B2</b>	<p>Materiale da utilizzare o ricollocare secondo la seguente priorità:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Riutilizzi a terra ( secondo la normativa vigente );</li> <li>2. Deposizione all'interno di bacini di contenimento con impermeabilizzazione laterale e del fondo;</li> <li>3. Smaltimento presso discarica a terra.</li> </ol>
<b>C1</b>	<p>Materiale da sottoporre a procedure di particolare cautela ambientale secondo la seguente priorità:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rimozione in sicurezza e avvio di specifiche attività di trattamento e/o particolari interventi che limitino l'eventuale diffusione della contaminazione;</li> <li>2. Rimozione in sicurezza e deposizione in bacini di contenimento con impermeabilizzazione laterale e del fondo;</li> <li>3. Smaltimento presso discarica a terra.</li> </ol>
<b>C2</b>	<p>Materiale da sottoporre a procedure di particolare cautela ambientale la cui rimozione e gestione devono essere valutate caso per caso.</p>

*Tabella 2- Classi di qualità del materiale caratterizzato e opzioni di gestione compatibili  
(APAT, ICRAM, 2006)*

Molti inquinanti organici prioritari unitamente ad alcuni metalli pesanti sono rilevati a concentrazioni sempre maggiori nei sedimenti di acque dolci e marine, persistendo lungamente, passando gradualmente nelle acque superficiali e nella catena alimentare, dove possono esercitare rilevanti effetti tossici.

I sedimenti contaminati compongono pertanto un problema ambientale importante per il nostro paese.

Quando si giunge alla decisione di asportare i sedimenti dalla loro sede naturale si deve affrontare un intervento che presenta rilevanti problematiche sia sul fronte tecnologico sia, soprattutto, sul fronte ambientale: è ormai pienamente accertato che l'escavazione dei fondali costituisce un'attività di notevole rischio, a causa della diffusa presenza di contaminanti contenuti nei sedimenti, derivanti in particolar modo delle attività di tipo industriale e commerciale svolte.

Si è consolidata quindi la necessità di una gestione sostenibile delle attività di dragaggio e di "messa a dimora" del materiale dragato.

Per quanto concerne, infatti, la problematica dello smaltimento dei materiali dragati, fino a tempi abbastanza recenti, la metodologia privilegiata è stata quella dell'immersione in mare. Successivamente, l'indicazione fornita dall'articolo 109 della legge 152/2006 è stata quella di considerare il materiale di risulta da dragaggio come una "risorsa" da recuperare, piuttosto che un materiale di rifiuto. In considerazione di ciò, dunque, un'alternativa da preferire allo scarico in mare è il riutilizzo dei materiali dragati, che a seconda delle caratteristiche chimico fisiche e della destinazione d'uso dovranno subire o meno specifici trattamenti.

Viene fornito un quadro minimo dei parametri da analizzare in qualunque contesto, a cui vanno aggiunti ulteriori parametri qualora non si possa escludere la presenza di particolari forme di inquinamento, dando comunque molta importanza alle analisi ecotossicologiche.

In particolare, oltre alle analisi fisico-chimiche risulta necessario effettuare anche indagini ecotossicologiche, per poter stimare correttamente il rischio ambientale legato alla movimentazione di matrici estremamente complesse quali i sedimenti. (APAT, ICRAM, 2006).

Il risultato finale di un corretto campionamento e di una attenta fase di analisi del sedimento è la sua appropriata classificazione qualitativa. A tal fine, mettendo a confronto i valori chimico-fisici ed ecotossicologici relativi alla caratterizzazione

Tra le tecnologie più innovative per il trattamento di sedimenti dragati, destinati ad un riutilizzo ecocompatibile, vi è il *soil washing* (SW). Si tratta di un processo di lavaggio dei terreni contaminati basato su meccanismi fisici e/o chimici che permettono di separare le matrici che compongono il suolo, permettendo di recuperare le diverse frazioni granulometriche (invece di smaltire interamente il tutto) e consentendo di concentrare gli eventuali inquinanti prevalentemente nella frazione fine.

Il SW sfrutta il principio secondo cui le sostanze inquinanti tendono ad aderire maggiormente alle particelle fini. Queste, infatti, si caratterizzano per una superficie specifica elevata e tendono pertanto ad adsorbire, a parità di peso, una quantità maggiore di inquinanti rispetto alle particelle grossolane. La tecnica del SW raggiunge l'obiettivo di separare la fase fine impregnata di inquinanti da quella più grossolana, attraverso il processo di lavaggio con fluidi estraenti (acqua soltanto o con aggiunta di acidi, basi, surfattanti, solventi o chelanti) la selezione granulometrica dei materiali lavati e la filtrazione finale della parte acquosa/fangosa (EPA, 1996).

136

Essendo i materiali in uscita dal SW selezionati e decontaminati, prospettive di reimpiego possono essere diverse (Bonomo et al., 2007):

- **Utilizzo come materiale di riempimento** – Secondo quanto stabilito dalla legge 27.12.2006, n. 296 (Finanziaria 2007), i materiali derivanti dalle attività di dragaggio e di bonifica, se non pericolosi all'origine o resi tali a seguito di trattamenti finalizzati alla rimozione degli inquinanti, possono essere refluiti su autorizzazione regionale, all'interno di casse di colmata, di vasche di raccolta, o comunque di strutture di contenimento poste in ambito costiero. I relativi progetti richiedono però la preventiva autorizzazione ministeriale.
- **Produzione di aggregati leggeri** – Prevede la sostituzione di parte dell'argilla naturale con la frazione fine di sedimenti, per ottenere granuli a bassa densità (0,6-1,2 t m<sup>3</sup>) utilizzabili in edilizia (per calcestruzzi leggeri). Il processo, condotto in forni a tamburo rotante, alla temperatura di circa 1.200 °C, comporta l'inertizzazione termica degli inquinanti inorganici e la volatilizzazione di quelli organici. Impianti di questo tipo sono stati recentemente realizzati in Olanda ed in Germania.
- **Produzione di mattoni** – Impiega materiale recuperato dai sedimenti in sostituzione di una frazione anche maggioritaria dell'argilla (fino al 70%) nella produzione di mattoni. Gli inquinanti subiscono processi di inertizzazione termica e di volatilizzazione. Un impianto di questo tipo è in funzione fin dal 1996 ad Amburgo, con una produzione annua di 5milioni di pezzi, prevalentemente impiegati nell'edilizia industriale e commerciale. I costi di produzione sono rilevanti anche per gli impegni connessi al trattamento delle emissioni.
- **Produzione di un granulato cementizio** – Processo che prevede la produzione di un granulato mediante aggiunta di cemento e/o altri additivi.

I metalli vengono immobilizzati nel reticolo cristallino, mentre le sostanze volatili e semivolatili vengono rimosse tramite una successiva fase di desorbimento termico.

Il processo è attualmente in fase di sperimentazione sia per quanto riguarda:

- la messa a punto della ricetta;
- la verifica delle caratteristiche meccaniche del prodotto;
- l'apprezzamento di eventuali rilasci, tramite test di cessione.

A seconda delle concentrazioni di inquinanti nel sedimento di origine sono possibili differenti destinazioni per il granulato prodotto: se il sedimento iniziale è classificato

come non pericoloso, il granulato potrà essere riutilizzato (per esempio riempimento in casse di colmata); se il sedimento è classificato come pericoloso, il granulato deve essere avviato allo smaltimento o al riutilizzo, in funzione della concentrazione residua di inquinanti e delle caratteristiche dell'eluato.

### 4.3 Ipotesi di trasporto da Isola Serafini a Misano Adriatico

Una volta valutate:

- fonte di sabbia a Isola Serafini;
- compatibilità granulometrica e litologica con la sabbia di Misano Adriatico;
- quantità di sabbia da portare a ripascimento;

è possibile procedere con le ipotesi di trasporto del materiale.

Poiché la sabbia prelevata sul fiume Po, è ipotizzabile come demaniale, per determinare il costo di quest'ultima, si fa riferimento unicamente al prezzo del trasporto che andrà poi confrontato con i prezzi dei materiali reperibili dalle fonti oggi in uso. Per essere competitivo, il progetto in esame dovrebbe comportare costi inferiori o almeno paragonabili a quelli noti. Di seguito viene mostrato un elenco dei prezzi relativo ai materiali prelevati nelle diverse fonti.

- *Sabbia acquistata in cava*, della quale si è discusso nei precedenti capitoli, per l'alto costo che comporta, dovrebbe essere utilizzata solamente per la riconfigurazione di arenili di alto pregio turistico o dove la particolare composizione dei sedimenti presenti, suggerisca l'apporto di un materiale specifico difficilmente reperibile in zone di recupero. Il costo per la fornitura e la posa in opera oscilla tra i 17 e i 32 €/mc.
- *Recupero di materiale da zone di sovra sedimentazione litorale*, il loro prezzo è di 7,08 €/mc.
- *Escavazione da porti*, di materiale depositato sul fondo. Il costo, comprensivo di scavo, trasporto e posa in opera è di 6 €/mc per distanze non superiori alle 6 miglia marine.
- *Prelievo di sabbie sottomarine*, il loro costo è di 15,50 €/mc.

Le ipotesi che saranno trattate nel seguito prevedono due diverse tipologie di trasporto:

- trasporto su gomma: da Isola Serafini a Misano Adriatico;
- trasporto fluvio-marittimo:
  - o da Isola Serafini a Portogaro: fluviale;
  - o da Portogaro a Misano: marittimo.

Si eseguirà dunque un confronto tra le due soluzioni apportate e si valuterà o meno la convenienza economica dell'intervento.

### 4.3.1 Ipotesi di trasporto su gomma

Per capire se il trasporto su gomma possa essere o no una valida alternativa per il trasporto di sabbia da Isola Serafini a Misano Adriatico sarà necessario valutare:

- quantitativo di sabbia che si vuole trasportare;
- lunghezza del percorso;
- costo degli autocarri relativo ad ogni tratta andata e ritorno;
- numero degli autocarri necessari;
- numero dei viaggi.

Il quantitativo di sabbia che si vuole portare a ripascimento è di 100.000 mc ogni 5 anni.

Il peso specifico della sabbia del Po di granulometria 0,6 mm è di circa 1,650 t/mc, pertanto a 100.000 mc di sabbia corrispondono 165.000 tonnellate.

Di seguito si riportano le tabelle ministeriali del “costo chilometrico medio relativo al consumo di gasolio delle imprese di autotrasporto per conto terzi”, distinti sulla base di cinque tipologie di veicolo e per diverse percorrenze chilometriche.

Si precisa a riguardo che:

- a. i dati relativi al prezzo del gasolio sono riferiti all’ultima rilevazione disponibile (Mese di Dicembre 2010) sul sito del Ministero dello Sviluppo Economico;
- b. per i veicoli di massa superiore alle 26 tonnellate e per quelli di massa complessiva inferiore alle 26 tonnellate e superiore alle 7,5 tonnellate, i dati relativi al prezzo del gasolio sono stati depurati dell’ IVA e dello sconto sull’accisa, pari a 19,784 €/1000 litri;
- c. per i veicoli di massa complessiva inferiore alle 7,5 tonnellate, i dati stessi sono stati depurati della sola IVA;
- d. non si è tenuto conto dell’incidenza, sul prezzo del carburante, della fonte di rifornimento dello stesso.

I mezzi necessari al trasporto in esame sono quelli appartenenti alla categoria superiore alle 26 tonnellate. Si fa pertanto riferimento alla prima tabella: Veicoli di massa complessiva pario superiore a 26 tonnellate.



Veicoli di massa complessiva pari o superiore a 26 tonnellate				
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l (al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
2,8	1,053	0,376	da 51 km a 150 Km	20,9%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l (al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
2,8	1,053	0,376	da 151 km a 250 Km	22,5%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l (al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
2,8	1,053	0,376	da 251 km a 350 Km	25,1%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l (al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
2,8	1,053	0,376	da 351 km a 500 Km	31,3%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l (al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
2,8	1,053	0,376	Oltre 500 km	33,6%

Veicoli di massa complessiva compresa tra 11,5 t e 26 t				
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4	1,053	0,263	da 51 km a 150 Km	15,4%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4	1,053	0,263	da 151 km a 250 Km	17,5%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4	1,053	0,263	da 251 km a 350 Km	20,2%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4	1,053	0,263	da 351 km a 500 Km	22,9%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA e sconto accise)	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4	1,053	0,263	oltre 500 km	25,3%

<b>Veicoli di massa complessiva compresa tra 3,5 t a 7,5 t</b>				
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA )	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4,9	1,072	0,219	da 51 km a 150 Km	13,6%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA )	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4,9	1,072	0,219	da 151 km a 250 Km	16,4%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA )	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4,9	1,072	0,219	da 251 km a 350 Km	19,9%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA )	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4,9	1,072	0,219	da 351 km a 500 km	20,2%
Consumo medio di carburante Km/l	Prezzo medio gasolio €/l ( al netto di IVA )	Costo medio di carburante per Km di percorrenza €/Km	Lunghezza tratta Km	Quota % dei costi di esercizio rappresentata dai costi del carburante
4,9	1,072	0,219	Oltre 500 km	21,4%

Le condizioni di mercato sono leggermente diverse da quelle delle tariffe ministeriali.

Infatti da indagini condotte si è appreso che la tariffa necessaria a coprire la tratta:

- Monticelli d'Ongina (Isola Serafini)-Misano Adriatico: 290 km (*Figura 4.3*)

è di :

- 650 €/a camion.



*Figura 4.3-Percorso stradale Monticelli d'Ongina - Misano Adriatico*

Ogni camion può trasportare al massimo 31 tonnellate. Va ricordato inoltre che il peso complessivo camion + merce, non deve superare per legge le 44 tonnellate.

Il prezzo è comprensivo di carburante e pedaggi autostradali per il tragitto di andata e ritorno.

A questo punto si ha:

- quantitativo di sabbia: 165.000 tonnellate;
- lunghezza del percorso: 650 km;
- carico massimo della merce per camion: 31 tonnellate.

Dividendo il quantitativo di sabbia da trasportare per la capienza massima del singolo mezzo, si ottiene:

$$165.000 \text{ t} : 31 \text{ t} = \text{circa } 5.300 \text{ viaggi}$$

Moltiplicando quindi il numero dei viaggi per il costo complessivo relativo ad ogni tratta, si ottiene:

$$5.300 \times 650 \text{ €/camion} = 3,4 \text{ Milioni di Euro circa}$$

Ipotizzando che l'appalto abbia una durata massima di 6 mesi: 5 giorni lavorativi per 26 settimane = 130 giorni lavorativi, si arriva alla conclusione che per trasportare il quantitativo richiesto, 100.000 mc, nei tempi richiesti, 6 mesi, occorrerebbe movimentare 40 mezzi al giorno (i mezzi disponibili vanno da 30 a 50 al giorno).

Il risultato parla chiaro, il trasporto su gomma è impensabile sia in termini economici che in termini di inquinamento che si verrebbe a produrre.

### 4.3.2 Ipotesi di trasporto fluvio-marittimo

L'utilizzo della rete idroviaria per il trasporto di merci presenta dei vantaggi, ma anche degli svantaggi se paragonata al trasporto su gomma.

#### Vantaggi:

- *buon livello di sicurezza per le merci;*
- *minore inquinamento;*

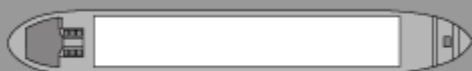
<b>3387 CR-N</b>	
	Motonave da carico per il servizio di trasporto merci in acque interne e promiscue. Dotata di tre stive adibite a carichi secchi.
	<b>Lunghezza m 75</b> <b>Larghezza m 9,50</b> <b>Immersione a pieno carico m 2,25</b>
<b>Portata 1000 ton equivalente a n° 35 camion</b>	
	

**3453 CR-N**

Motonave da carico per il servizio di trasporto merci in acque interne e promiscue.  
Dotata di piano unico adibito a carichi secchi.

**Lunghezza m 70**  
**Larghezza m 9,50**  
**Immersione a pieno carico m 2,25**

**Portata 1000 ton equivalente a n° 35 camion**

**3468 CR-N**

Motonave da carico per il servizio di trasporto merci in acque interne e promiscue.  
Dotata di piano unico adibito a carichi secchi.

**Lunghezza m 50**  
**Larghezza m 8,50**  
**Immersione a pieno carico m 1,80**

**Portata 480 ton equivalente a n° 17 camion**

**3390 CR-N**

Motonave da carico per il servizio di trasporto merci in acque interne e promiscue.  
Dotata di due stive adibite a carichi secchi.

**Lunghezza m 46**  
**Larghezza m 8**  
**Immersione a pieno carico m 2,15**

**Portata 400 ton equivalente a n° 14 camion**



- *meno incidenti stradali:*



- *nessuna limitazione per i carichi pericolosi.*

### **Svantaggi:**

- *lentezza delle chiatte;*
- *maltempo.*

Anche in questo caso, per valutare la convenienza economica dell'idrovia occorre stimare:

- quantitativo di sabbia che si vuole trasportare;
- lunghezza del percorso;
- costo di ogni chiatte relativo ad ogni tratta andata e ritorno;
- numero di viaggi.

Per quel che concerne il tragitto, si sono fatte alcune considerazioni dalle quali si è dedotto che il percorso migliore fosse:

- **Isola Serafini – Portogaribaldi: 150 miglia**
- **Portogaribaldi – Misano Adriatico: 45 miglia**

utilizzando due mezzi differenti.

Infatti essendo i due percorsi di lunghezza uno il doppio dell'altro, l'utilizzo di un unico mezzo tra Isola Serafini e Misano, comporterebbe un eccessivo aumento dei tempi di percorrenza, che si andrebbero ad incrementare ulteriormente in caso di maltempo, essendo il secondo tratto in mare.

Allo stesso modo, è sconsigliabile l'utilizzo di camion per eseguire il trasporto una volta giunti a Portogaribaldi, per gli eccessivi costi che si verrebbero a creare.

Utilizzando due mezzi differenti, uno unicamente fluviale e uno di tipo fluvio-marittimo, si potrebbe invece suddividere il tragitto in due parti. In questo modo, anche



in caso di maltempo, le chiatte fluviali continuerebbero a portare materiale fino al porto di Portogaribaldi, limitando i ritardi sul trasporto complessivo.

Le chiatte fluvio – marittime, sono scelte in modo da poter eseguire anche la posa del materiale sulla spiaggia.

Da indagini di mercato, si sono valutati i due tipi di mezzi utilizzabili, il loro carico, caratteristiche tecniche e il loro costo giornaliero:

- mezzo fluviale: **motonave CAESAR.**

- lunghezza: 50 m
- larghezza: 7,5 m
- altezza: 2,5 m
- portata: 350 mc
- pescaggio a vuoto: 1,10 m
- velocità: 7/8 Nodi

Equipaggiamento:

- motore da 500 cavalli;
- cabina di pilotaggio telescopica (a pistoncini) che si può abbassare rendendo agevole il passaggio sotto i ponti, per cui adatta a lavori lungo i fiumi;
- escavatore RB30: benna generica 2,5 mc;
- licenza per il trasporto rifiuti e trasporto in conto terzi;
- adatta per il trasporto su canali e in presenza di secche.

Prezzo:

- 2000 €al giorno



- Mezzo fluvio – marittimo: **motonave FERNANDO**

- lunghezza: 51 m
- larghezza: 14 m
- altezza: 4 m
- portata: 1600 tonnellate
- pescaggio a vuoto: 1,50 m
- velocità: 7/8 Nodi

Equipaggiamento:

- 2 motori da 1100 cavalli ciascuno;
- escavatore LIEBHERR 895. capacità di carico fino a 200 tonnellate che permette il sollevamento di grossi carichi e agevola i lavori di scavo e costruzione;
- sistema di BOW – TRUSTER che rende più agevoli le manovre grazie a due eliche di prua, sostenute da un motore di 500 cavalli;
- benna da scavo da 14 mc;
- benna a polipo da 5 mc;
- braccio da 30 m, allungabile fino a 50 m, che permette un ampio raggio di azione per le operazioni di carico e scarico dei materiali;
- escavatore posizionato a prua;
- dotazioni necessarie per la navigazione internazionale;
- tre ancore (una di poppa e due di prua) che facilitano le operazioni in caso di condizioni avverse;
- 2 pali di ormeggio (uno di prua e uno di poppa) utilizzati per un più preciso avanzamento di dragaggio.
- idonea all'esecuzione di lavori marittimi senza limitazioni dovute alle grandi distanze o alle avverse condizioni atmosferiche.

Prezzo:

- 6500 € al giorno



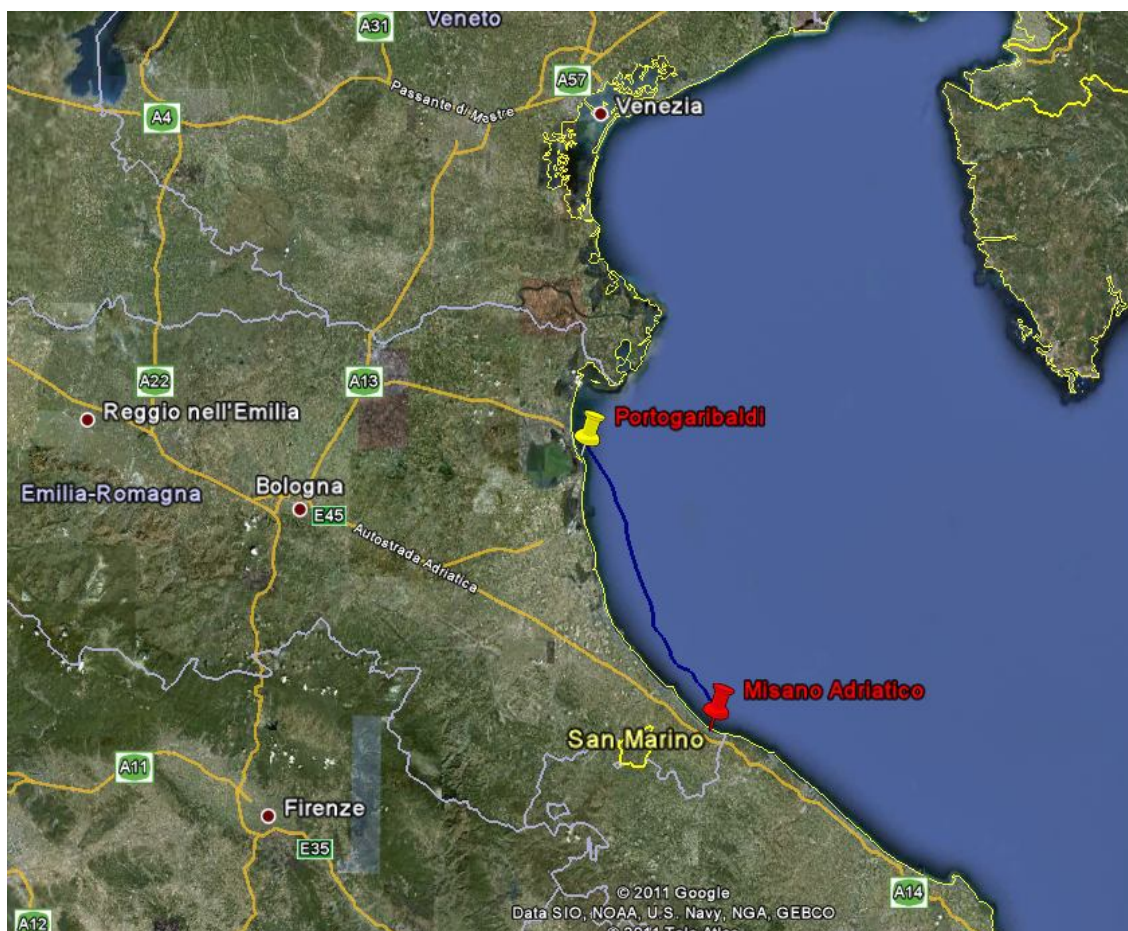
Per quanto attiene il percorso:

- tratto Isola Serafini – Portogaribaldi (150 miglia): motonave CAESAR

#### RETE IDROVIARIA PADANO - VENETA IN ESERCIZIO



- tratto Portogaribaldi – Misano (45 miglia): motonave FERNANDO



Si valutano ora i costi relativi le singole tratte:

**I° Tratta:**

- Isola Serafini – Portogaribaldi: 150 miglia
- velocità 7,5 Nodi
- 20 ore di navigazione, 40 andata e ritorno, circa 2 giorni;
- prezzo motonave: 4000 €per due giorni (andata e ritorno)
- carico motonave 350 mc, 577 tonnellate
- numero di viaggi:  $165.000 \text{ t} : 577 \text{ t} = 280$  viaggi circa
- costo totale:  $280 \text{ viaggi} \times 4000 \text{ €} = 1,12$  Milioni di Euro circa
- **costo della sabbia in base al trasporto: 6,93 €/tonnellata o 11,4 €/mc**

**II° Tratta:**

- Portogaribaldi – Misano Adriatico: 45 miglia;
- velocità 7,5 Nodi;
- 6 ore di navigazione, 12 ore andata e ritorno, 1 giorno;
- prezzo motonave: 6500 €per un giorno;
- carico motonave 1600 tonnellate, 970 mc circa;
- numero di viaggi:  $165.000 \text{ t} : 1600 \text{ t} = 100$  viaggi circa
- costo totale:  $100 \text{ viaggi} \times 6500 \text{ €} = 650$  Mila Euro circa
- **costo della sabbia in base al trasporto: 4,06 €/tonnellata o 6,7 €/mc**

 **Complessivamente il prezzo della sabbia è di 10,99 €/tonnellata o 18,1 €/mc.**

A tale costo vanno aggiunti per entrambe le tratte i costi di:

- scarico/carico: 0,80 €/t.

### 4.3.3 Risultati

Per valutare se l'intervento sia economicamente vantaggioso o meno, occorre eseguire un confronto con le altre due fonti di approvvigionamento trattate:

- da cave a terra;
- da depositi sottomarini.

Per quel che concerne il confronto con le cave a terra, il costo della sabbia trasportata con mezzi fluvio – marittimi è sicuramente inferiore:

- 20 €/mc, materiale di cava a terra;
- 18,1 €/mc materiale prelevato dal Po.

Il confronto con le sabbie sottomarine è invece diverso.

Infatti il costo della sabbia sottomarina, comprensivo di fornitura e posa in opera, si aggira attorno ai 15,50 €/mc. Tale valore è evidentemente inferiore rispetto ai 18,1 €/mc della sabbia del Po.

Si devono però considerare gli aspetti legati alle tempistiche di ripascimento e ai diametri delle sabbie utilizzate.

Si è infatti dedotto, dalle modellazioni precedenti, che un utilizzo di sabbia prelevata dal Po, di granulometria 0,6 mm, ha nel complesso un costo superiore rispetto alla sabbia prelevata da giacimenti sottomarini, ma necessita di interventi condotti ad intervalli temporali ben più ampi.

Si valutano quindi i costi complessivi relativi alle due possibili granulometrie: 0,2 mm e 0,6 mm.

#### ***Sabbia con granulometria 0,1-0,2 mm:***

- quantità di sabbia da portare a ripascimento: 100.000 mc ogni 2 anni;
- costo della sabbia prelevata da cava sottomarina: 15,50 €/mc;
- 1.550.000 Euro;
- essendo questo tipo di intervento da effettuare ogni 2 anni, il costo è di:  
**775.000 Euro all'anno;**
- questo costo è comprensivo di trasporto e posa in opera.

#### ***Sabbia con granulometria 0,6 mm:***

- quantità di sabbia da portare a ripascimento: 100.000 mc ogni 5 anni;
- costo della sabbia prelevata dal fiume Po: 18,1 €/mc;
- 1.810.000 Euro;

- essendo questo tipo di intervento da effettuare ogni 5 anni, il costo è di:  
**352.000 Euro all'anno;**
- questo costo è comprensivo di trasporto e posa in opera.

Il fatto di poter eseguire l'intervento ogni 5 anni determina quindi una diminuzione del costo della sabbia anche rispetto al prelievo da cava sottomarina.

Il motivo per cui è stata scelta la spiaggia di Misano Adriatico è stato dettato dalla somiglianza delle due sabbie determinata dal confronto dell'analisi granulometrica. Va inoltre detto che in passato questa spiaggia era caratterizzata da ciottoli e per questo si è pensato di non danneggiare l'aspetto paesaggistico apportando materiale con granulometria di poco superiore a quella attualmente presente.

Se quindi in prima istanza il costo della sabbia prelevata dal Po può sembrare fortemente condizionato dal trasporto, considerando i tempi tecnici di intervento questo risultato subisce delle modifiche, rivelandosi più vantaggioso.

Si comprende dunque come per avere delle valutazioni attendibili dei costi del materiale in relazione alla sua fonte di prelievo, si devono valutare molteplici aspetti:

- il sito di intervento;
- le modalità di intervento;
- l'intervallo temporale con il quale eseguire i versamenti;
- i costi di trasporto.

## Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di fornire delle soluzioni alternative alle fonti di approvvigionamento dei materiali da ripascimento.

Infatti questi tipi di interventi stanno sempre più prendendo piede nel nostro paese come risposte al crescente problema dell'erosione costiera. Purtroppo però la questione fondamentale a riguardo è incentrata sulla ricerca dei materiali idonei.

Ecco che lo spunto qui offerto potrebbe fornire una valida alternativa al prelievo dei materiali da cave a terra e da cave sottomarine.

Sono state eseguite indagini per determinare le tempistiche di intervento dalle quali si è visto che un ripascimento eseguito con le sabbie del Po, di granulometria 0,6 mm, può essere effettuato ogni 5 anni, diversamente da quanto avviene per l'uso di sabbie di granulometria 0,2 mm, attualmente in uso, effettuato ogni 2 anni.

In secondo luogo sono state valutate le modalità di trasporto della sabbia del Po:

- trasporto su gomma;
- trasporto fluvio – marittimo.

La prima soluzione appare del tutto inadeguata sia dal punto di vista economico che ambientale.

La seconda, in parte potrebbe essere accettata, ma è comunque indice di una forte mancanza nelle nostre realtà. Infatti, essendo il trasporto idroviario poco sviluppato in Italia, si assiste ad una richiesta eccessiva in termini economici, dettata dall'assenza di una concorrenza diretta nel settore.

Il motivo di questo scarso sviluppo va ricercato nella politica dei trasporti attuata dai Governi negli anni passati, che hanno sovvenzionato altri progetti piuttosto che privilegiare le vie navigabili.

Tra i vari problemi che bloccano lo sviluppo della rete, si possono annoverare:

- mancanza di uno standard ottimale;
- relazioni di traffico limitate;
- manutenzione dei fondali navigabili;
- flotte limitate;
- inefficienza o mancanza di vie di accesso al mare.



Tuttavia, nel complesso, il grande impatto economico derivante dal trasporto, è fortemente mitigato dalla possibilità di eseguire i versamenti di sabbia più diluiti nel tempo.

La fattibilità è quindi da considerare positiva ma ha permesso di evidenziare dei problemi inerenti alle reti di trasporto idroviario.

Sarebbe un peccato non poter utilizzare un materiale disponibile in natura per via di problematiche relative alla mobilità. La speranza è quella di poter un giorno progredire anche in questa direzione.

## Bibliografia

- Mentino Preti, *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*, Quaderni ARPA - Regione Emilia Romagna
- Ugo Tomasicchio, *Manuale di ingegneria portuale e costiera*, BIOS
- Luisa Nicoletti, Daniela Paganelli, Massimo Gabellini, *Aspetti ambientali del dragaggio di sabbie relitte a fini di ripascimento: proposta di un protocollo di monitoraggio*, Quaderni ICRAM
- Barbara Zanuttigh, *Idraulica Marittima*. edito da ALMA-DL Alma Mater Università di Bologna e depositato presso la BNCF, 2006
- Mentino Preti, *Ripascimento di spiagge con sabbie sottomarine*, ARPA
- Autorità di Bacino del fiume Po, *Aggiornamento delle analisi morfologiche e del bilancio del trasporto solido dell'asta del fiume Po da confluenza Stura di Lanzo all'incile del delta (periodo 2002-2005) e report di valutazione*
- Paolo Spezzani, Giuliano di Baldassarre, Alberto Montanari, *Idraulica del Po e scenari di trasporto solido allo stato attuale e in presenza di sbarramenti*, ARPA rivista n.4 luglio-agosto 2009
- Consorzio navigare sul Po, *La navigazione sul fiume Po*
- Italo Galvani, *Il trasporto merci nel Po e nell'Idrovia Feffarese*, ARNI Azienda Regionale per la Navigazione Interna
- Mirko Castagnetti, *Artificial surfing reefs per la difesa e la riqualificazione della costa: ipotesi progettuale a Cattolica (Rn)*, tesi di laurea, Bologna 2009
- Andrea Marullo, *Dissesto altimetrico del fiume Po e ipotesi di riutilizzo delle sabbie di dragaggio per il ripascimento del litorale*

- Provincia di Piacenza, PIAE 2001, Relazione Tecnica
- Vittorio Molinari, *Piano del trasporto merci della logistica*
- Autorità di Bacino del Fiume Po, *Il recupero morfologico ed ambientale del fiume Po*